

TARTU ÜLIKOOL  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Füüsika Instituut

Sulev Tõkke

**SUUREMASTAAPSE ATMOSFÄÄRITSIRKULATSIOONI MÕJU  
AASTAAEGADE NIHKUMISELE LÄÄNEMERE PIIRKONNAS**

Magistritöö (30 EAP)  
Füüsika eriala

Juhendajad:  
Piia Post, PhD  
Velle Toll, PhD

Tartu 2021

## **Suuremastaapse atmosfäärtsirkulatsiooni mõju aastaaegade nihkumisele Läänemere piirkonnas**

Läänemere piirkonnas on suved muutunud pikemaks, talved on muutunud lühemaks ja temperatuuri aastase käigu amplituud on vähenenud. Läänemere piirkonna ilma kujundab väga olulisel määral suuremastaapne atmosfäärtsirkulatsioon Põhja-Atlandil, mille üks tähtsamaid komponente on polaarne jugavool. Varasemad uuringud on näidanud, et polaarne jugavool on nihkunud poolusele lähemale ja muutunud kiiremaks, mis peaks Põhja-Euroopas kaasa tooma soojemaid talvesid ning mõjutama aastaaegade algusaegu ja temperatuuri aastase käigu amplituudi. Käesolevas magistritöös uurisin, kas ja millisel määral on aastaaegade nihkumine Läänemere piirkonnas seotud polaarsete jugavoolude muutustega. Analüüsi tulemusena selgus, et jugavoolu oleku muutused on panustanud temperatuuri aastase käigu amplituudi vähenemisse ja kevade alguse varasemaks nihkumisse, aga aeglustanud keskmise temperatuuri tõusu oktoobris.

**Märksõnad:** suuremastaapne atmosfäärtsirkulatsioon, Põhja-Atlandi polaarne jugavool, aastaaegade nihkumine, Läänemere piirkond, kliimamuutused.

**CERCS:** P500 - Geofüüsika, füüsikaline okeanograafia, meteoroloogia.

## **The Impact of Large-Scale Atmospheric Circulation on Seasonal Shift in the Baltic Sea Area**

Summers have become longer, winters have become shorter and the amplitude of the seasonal cycle of temperature has decreased in the Baltic Sea area. Weather in the Baltic Sea area is to a great extent influenced by large-scale atmospheric circulation in the North Atlantic sector, where one of the most important circulation phenomena is the polar jet stream. Earlier studies have shown that the jet stream has shifted poleward and become faster, which should bring warmer winters to Europe and influence the starting date of seasons and the amplitude of the seasonal cycle of temperature. In this thesis I studied if and how much is the seasonal shift in the Baltic Sea area connected to changes in the polar jet stream. The analysis showed that changes in the jet stream have decreased the amplitude of the seasonal cycle of temperature and contributed to an earlier start of spring, but have also slowed the warming in October.

**Keywords:** large-scale atmospheric circulation, North Atlantic polar jet stream, seasonal shift, Baltic Sea area, climate change.

**CERCS:** P500 - Geophysics, physical oceanography, meteorology.

# Sisukord

<b>Sissejuhatus</b>	<b>4</b>
<b>1 Teoreetiline taust</b>	<b>5</b>
1.1 Suuremastaapne atmosfääricsirkulatsioon Põhja-Atlandi ja Euroopa sektoris . .	5
1.1.1 Kaugseosed ja blokeeringud . . . . .	6
1.1.2 Jugavoolud ja tsüklonid . . . . .	8
1.1.3 Polaarne jugavool Põhja-Atlandi sektoris . . . . .	9
1.2 Kliimamuutused Läänemere piirkonnas . . . . .	11
1.2.1 Üldised trendid . . . . .	11
1.2.2 Aastaaegade nihkumine . . . . .	13
1.3 Magistritöö hüpoteesid . . . . .	14
<b>2 Andmed ja meetodid</b>	<b>16</b>
2.1 Kasutatud andmed . . . . .	16
2.2 Jugavoolu tuvastamise meetod . . . . .	18
2.3 Statistilised meetodid . . . . .	19
<b>3 Tulemused ja arutelu</b>	<b>20</b>
3.1 Temperatuur, sademed ja õhurõhk . . . . .	20
3.2 Seosed jugavoolu oleku ja Läänemere piirkonna ilma vahel . . . . .	27
3.3 Muutused polaarse jugavoolu olekus . . . . .	33
3.4 Arutelu . . . . .	38
<b>Kokkuvõte</b>	<b>41</b>
<b>Tänuavaldused</b>	<b>42</b>
<b>Kasutatud kirjandus</b>	<b>43</b>
<b>Lihtlitsents</b>	<b>50</b>

# Sissejuhatus

Läänemere piirkonnas on toimunud muutused aastajalises tsüklis: suved on muutunud pikemaks, talved on muutunud lühemaks ja temperatuuri aastane amplituud on vähenenud (Jaagus *et al.*, 2003; Kull *et al.*, 2008; Czernecki ja Miętus, 2017; Räisänen, 2019). Läänemere piirkonna ilma kujundab väga olulisel määral suuremastaapne atmosfäärsirkulatsioon Põhja-Atlandil, mille oluline komponent on polaarne jugavool (Hurrell, 1995; Hurrell *et al.*, 2003; Jaagus *et al.*, 2003; Zveryaev, 2007; Woollings *et al.*, 2008; Vallis ja Gerber, 2008; Hall *et al.*, 2015; BACC II autorite meeskond, 2015). Polaarne jugavool on muutunud kiiremaks ja nihkunud poolusele lähemale (Stocker *et al.*, 2013), mis peaks Põhja-Euroopas kaasa tooma soojemaid talvesid (Woollings *et al.*, 2018b) ning mõjutama aastaegade algusaegu ja temperatuuri aastase käigu amplituudi (Jaagus *et al.*, 2003; Zveryaev, 2007; Stine ja Huybers, 2012). Nende teadmiste põhjal võiks eeldada, et aastaegade nihkumine Läänemere piirkonnas tuleneb suuresti muutustest Põhja-Atlandi polaarses jugavoolus, aga otsest seost jugavoolu oleku muutuste ja Läänemere piirkonna aastaegade nihkumise vahel on seni siiski vähe uuritud. Käesoleva magistritöö eesmärk on seda seost hinnata ning otsida kinnitust järgnevatele hüpoteesidele:

- Ajaperioodil 01.1950 - 02.2021 on Põhja-Atlandi polaarne jugavool muutunud kiiremaks ja nihkunud põhja poole. Muutused on kõige suuremad talvel ja kevadel ning see põhjustab Läänemere piirkonnas talvede hilisema alguse ja talvede lühenemise, kevade varasema alguse ning temperatuuri aastase käigu amplituudi vähenemise.
- Võrreldes talve ja kevadega on sügisel jugavoolu asukoht ja kiirus muutunud vähe või isegi vastupidises suunas. Selle tõttu on keskmise temperatuuri tõus sügisel olnud mõõdukam kui talvel ja kevadel ning see seletab ka sügiskuudel vähenenud tormisust.

Magistritöö esimeses peatükis annan ülevaate teemaga seotud teoreetilisest taustast ja varasematest uurimustöödest ning peatüki lõpus käsitlen põhjalikumalt magistritöö hüpoteese ja uurimisküsimusi. Teises peatükis kirjeldan magistritöös kasutatud andmeid ja meetodeid ning kolmandas peatükis esitan töö tulemused ja arutelu.

# Peatükk 1

## Teoreetiline taust

Käesolevas peatükis annan ülevaate suuremastaapsest atmosfäärtsirkulatsioonist ning sellega seotud nähtustest Põhja-Atlandi ja Euroopa sektoris. Kõigepealt kirjeldan atmosfääri kaugseoseid ja blokeeringuid, mis on olulised kesklaiste ilma kujundavad nähtused. Seejärel keskendun Põhja-Atlandi polaarsete jugavoolule ning kirjeldan selle tekkimise põhjuseid ja seoseid Läänemere piirkonna ilmaoludega. Ühtlasi annan ülevaate Läänemere piirkonnas toimunud kliimamuutustest ja aastaaegade nihkumisest. Peatüki lõpus sõnastan magistritöö uurimisküsimused ja püstitan töö peamised hüpoteesid.

### 1.1 Suuremastaapne atmosfäärtsirkulatsioon Põhja-Atlandi ja Euroopa sektoris

Suuremastaapset atmosfäärtsirkulatsiooni Põhja-Atlandi ja Euroopa sektoris iseloomustab peamiselt kolm nähtust: Põhja-Atlandi ostsillatsioon, õhuvoolude tsonaalsus ja blokeeringute sagedus (Rutgersson *et al.*, 2014). Need nähtused on omavahel seotud, sest nii Põhja-Atlandi ostsillatsioon kui ka blokeeringute sagedus väljendavad tegelikult tsonaalse õhuvoolu intensiivsust (Woollings *et al.*, 2008; Vallis ja Gerber, 2008). Atlandilt Euroopasse puhuvate tsonaalsete tuulte intensiivsus määrab aga Läänemere piirkonnas aastaaegade algusaegu ja kestvust ning temperatuuri aastase käigu amplituudi (Jaagus *et al.*, 2003; Zveryaev, 2007). Põhja-Atlandi ostsillatsiooni ja teisi sarnaseid nähtusi nimetatakse kirjanduses nii kaugseosteks kui ka muutlikkuse mustriteks (Wanner *et al.*, 2001).

### 1.1.1 Kaugseosed ja blokeeringud

Kui teostada Põhja-Atlandi ja Euroopa sektoris merepinnatasemele taandatud õhurõhule peakomponentanalüüs, siis on selle esimest järku komponendiks Põhja-Atlandi ostsillatsioon (ingl *North Atlantic Oscillation*, NAO), millel on talvel tugev korrelatsioon atmosfääri ja mere olekuparameetritega Läänemere piirkonnas (Rutgersson *et al.*, 2014). Põhja-Atlandi ostsillatsiooni iseloomustab õhurõhu dipool, mille madalrõhukese asub ligikaudu Islandi juures ja kõrgrõhukese asub lõunas Assoori saarte juures. Keskmisest suurem/väiksem rõhugradient Assooride ja Islandi vahel annab positiivse/negatiivse NAO indeksi. NAO on domineeriv meretaseme õhurõhu muutlikkuse muster Atlandi ookeani kohal ning see on peamine mitmeaastasel ajaskaalal atmosfääri tsirkulatsiooni muutlikkust väljendav nähtus põhjapoolkera keskmistel ja kõrgetel laiustel (Walker ja Bliss, 1932; Hurrell, 1995; Hurrell *et al.*, 2003).

NAO faasi muutumine toob kaasa suuri muutusi keskmises tuule kiiruses ja suunas Atlandil, soojuse ja niiskuse transpordis Atlandi ja ümbritsevate mandrite vahel, ning tormide arvus, tugevuses ja nende trajektoories. NAO muutlikkus on suurim talveperioodil ja sellel on oluline mõju Euroopa talvisele kliimale (Hurrell *et al.*, 2003). Suure positiivse NAO indeksiga talvede korral on Atlandilt Euroopa suunas puhuvad läänetuuled palju tugevamad kui madala NAO indeksiga talvedel, maksimaalse niiskuse transpordi telg Atlandil on orienteeritud rohkem edela-kirde suunas ning see ulatub Põhja-Euroopas palju kaugemale põhja ja itta võrreldes negatiivse NAO indeksi olukorraga (Hurrell, 1995). Seega viitab positiivne NAO indeks pehmetele ja sajastele talvedele ning negatiivne indeks külmadele ja kuivadele talvedele Põhja-Euroopas (Rutgersson *et al.*, 2014).

Vaatamata mitmeaastasele muutlikkusele on esinenud ka perioode, kui kindel NAO faas on domineerinud paljude talvede jooksul. Eelmise sajandi algusest kuni 1930ndate aastateni oli talviti Islandi miinimumi lähedal õhurõhk anomaalselt madal, samas kui lõunapoolsematel laiustel oli õhurõhk anomaalselt kõrge. Sellest tulenevalt puhusid Põhja-Atlandil tugevad läänetuuled, mis kandsid sooja ja niisket merelist õhku Euroopasse, kus olid keskmisest soojemad talved. Alates 1940ndate algusest kuni 1970ndate alguseni oli NAO indeksil negatiivne trend ja Euroopa talved olid tihti keskmisest külmemad. Seejärel trend pöördus ja kuni 1990ndate keskpaigani domineeris NAO positiivne faas. Sellesse perioodi jäid ka rekordiliselt kõrge NAO indeksiga talved (Hurrell, 1995). Hiljem on NAO negatiivset faasi jälle rohkem esinenud (Rutgersson *et al.*, 2014), mis oleks pidanud kaasa tooma külmemad talved, aga seda pole juhtunud (Lakson *et al.*, 2019).

Peakomponentanalüüsi teist järku komponent on Ida-Atlandi muster (ingl *East-Atlantic pattern*, EA) (Wallace ja Gutzler, 1981; Barnston ja Livezey, 1987), mis väljendab põhja-lõuna sihilisi muutusi NAO mõjukeskmete asukohas. Selle negatiivsed väärtused

vastavad NAO mõjukeskmete lõunasuunalisele nihkele ja seega madalamatele temperatuuridele Põhja-Euroopas, positiivsed väärtused vastavad tugevamale läänevoolule ja seega soojematele talvedele (Moore *et al.*, 2011).

Kolmas oluline kaugseos on Skandinaavia muster (ingl *Scandinavian pattern*, SCA), mida nimetatakse ka Euraasia mustriks (Wallace ja Gutzler, 1981) või blokeeringute mustriks (Hurrell ja Deser, 2010). Skandinaavia muster väljendab NAO põhjapoolse mõjukeskme ida-lääne sihelist nihkumist. Positiivses faasis iseloomustab seda kõrge rõhu anomaalia Skandinaavia kohal ja madala rõhu anomaalia Gröönimaa kohal, negatiivset faasi nimetatakse Atlandi kõrgrõhuharjaks (Rutgersson *et al.*, 2014).

Lisaks Põhja-Atlandi ostsillatsioonile kasutatakse kirjanduses sageli ka Arktika ostsillatsiooni (ingl *Arctic Oscillation*, AO) ja põhjapoolkera aastast režiimi (ingl *Northern Hemisphere Annular Mode*, NAM) (Thompson ja Wallace, 1998; Thompson ja Wallace, 2001; Wallace, 2000; Thompson *et al.*, 2003; Feldstein ja Franzke, 2006). AO ja NAM on omavahel ekvivalentsed ning need on sisuliselt NAO laiendused kogu põhjapoolkerale.

Blokeeringud on keskmistel ja kõrgetel laiustel atmosfääris esinevad nähtused, mida iseloomustab kvaasistatsionaarsus ning tavalise läänevoolu ja tormideradade tõkestatus. Blokeeringud väljenduvad tavaliselt suure antitsükloonaalse anomaaliana, mis osades piirkondades keerab ringi tavalise läänevoolu, nii et tekivad idatuuled. Häirides tavalist läänevoolu nädalaks või pikemaks ajaks, põhjustavad blokeeringud ekstreemseid ilmanähtusi nagu suviseid kuumalained ja talviseid külmalained (Woollings *et al.*, 2018a). Blokeeringute esinemissagedusel on mitmeaastakümnene muutlikkus, näiteks on blokeeringud olnud sagedased 1910ndatel, 1940ndatel, 1960ndatel ja 1990ndate teises pooles, blokeeringuid esines vähe 1920ndatel, 1970ndatel ja 1990ndate esimeses pooles. Käsitletuna koos NAOga on blokeeringute esinemissageduse muutlikkus heas kooskõlas talviste temperatuuri- ja tuuleanomaaliatega Läänemere piirkonnas 20. sajandil (Rimbu ja Lohmann, 2011; Rutgersson *et al.*, 2014).

Nagu juba eespool öeldud, siis nii Põhja-Atlandi ostsillatsioon kui ka blokeeringute sagedus näitavad tegelikult tsonaalse õhuvoolu intensiivsust (Woollings *et al.*, 2008; Vallis ja Gerber, 2008). See tähendab, et enamus keskmiste ja kõrgete laiuste atmosfääri kaugseostest on seotud polaarse jugavoolu asukoha ja tugevusega ning kaugseoseindeksid väljendavad jugavoolu olekut (Wittman *et al.*, 2005; Monahan ja Fyfe, 2006). Seega on jugavoolud ühed kõige olulisemad globaalse atmosfääritsirkulatsiooni komponendid (Lee ja Kim, 2003) ning suur osa kesklaiste ilmast on mõjutatud polaarse jugavoolu ja sellega seotud tormideraja poolt (Woollings *et al.*, 2010a; O'Reilly *et al.*, 2017; Baker *et al.*, 2017).

### 1.1.2 Jugavoolud ja tsüklonid

Ümber kogu Maa ulatuv tugevate läänetuulte pööris troposfääri ülaosas ehk jugavool kirjeldati 1940ndatel Carl Gustav Rossby poolt (Rossby ja Willett, 1948). Järgnevatel aastatel sai selgeks, et mõlemal Maa poolkeral on kaks jugavoolu: lähistroopiline jugavool ja polaarne jugavool (Krishnamurti, 1961). Lähistroopilised jugavoolud moodustuvad soojuslikult otsese Hadley tsirkulatsiooni poolt edasi kantavast impulsimomendist kitsasse atmosfäärikihti troposfääri ülaosas Hadley raku poolusepoolsetele piiridele (Held ja Hou, 1980). Polaarne jugavool tekib impulsi ja soojuse voogudest, mis pärinevad keskklaiuste tsüklonitest, ning seetõttu nimetatakse polaarseid jugavoolu pööristest aetud jugavooluks (ingl *eddy-driven jet*) (Williams, 1979; Panetta ja Held, 1988; Woollings *et al.*, 2010a). Polaarne jugavool asub maksimaalse barokliinsuse piirkonnas, kus tsükcloneid tekib kõige rohkem (Eichelberger ja Hartmann, 2007). Selline piirkond on keskklaiustel asuv polaarfront, kus tugev meridionaalne temperatuurigradient eraldab külma polaarseid õhku soojast lähistroopilisest õhust. Tsüklonid ka liiguvad enamasti mööda polaarfronti ja seega asuvad seal keskklaiuste tormiderajad (Hoskins ja Valdes, 1990).

Tähtis jugavoolude omadus on meandreerumine. Õhuvool üle mingi aluspinna ebatasasuse, nagu näiteks mäeaheliku, põhjustab jugavoolu kõrvalekallet oma algsest suunast. Kui häiritus on juba tekkinud, jätkab jugavool põhja-lõuna suunas meandreerumist, kuigi üldine vool on ikkagi läänest. Sellise meandreerumise käigus tekkivaid lookeid nimetatakse Rossby laineteks. Piirkondi, kus jugavool lookleb ekvaatori poole, nimetatakse madalrõhulohkudeks, sest jugavoolust pooluse suunas olevat madalamat õhurõhku tuuakse seal ekvaatorile lähemale. Piirkondi, kus jugavool lookleb lähemale poolusele, nimetatakse kõrgrõhuharjadeks, sest seal ulatub lõunapoolne kõrgem õhurõhk kaugemale pooluse poole. Rossby lainete lohud ja harjad liiguvad tavaliselt ajaga ida suunas ning need on tsüklonite tekkeks olulised (Stull *et al.*, 2018).

Nii tsüklonite tekkes kui ka jugavoolude dünaamikas on tähtsal kohal ka hüdrodünaamikas hästi teada nähtus, mis seisneb selles, et voolujuga, milles on suur kiiruslik nihe, võib olla ebastabiilne väikeste häirituste suhtes. Sellises ebastabiilses joas on igal väikesel häiritusel tendents võimenduda, saades kasvades joalt energiat. Seda nähtust nimetatakse barokliinseks ebastabiilsuseks (Holton ja Hakim, 2013). Tsüklonid saavad alguse lainekujulisest häiritusest läänevoolus ning noore tsükloni süvenemiseks on vajalik, et aluspinnal asuv häiritus ehk frontaallaine ei asuks kohakuti lainega ülemistes õhuvooludes. Selline ruumiline nihe saab tekkida barokliinses atmosfääris, kus esineb termiline tuul ehk läänetuulte vertikaalne nihe, mis avaldub meandreeruva jugavooluna (Charney, 1947; Eady, 1949; Stull *et al.*, 2018). Tsüklonid saavad energiat atmosfääri barokliinsusest, aga õhuringlus nendes vähendab barokliinsust, liigutades külma õhku ekvaatori suunas ja sooja õhku pooluse suunas ning segades õhumasse kokku. Seega aitavad tsüklonid jaotada soojust ekvaatori ja pooluste vahel (Stull *et al.*, 2018).



Pööristest aetud jugavoolude tekke dünaamikat on uurinud näiteks Williams (1979), Panetta ja Held (1988), Panetta (1993) ja Lee (1997). Nendes uuringutes kasutatud mudelites tuleneb tsonaalne õhuvool laiast ühtlase barokliinsuse tsoonist, mis tekitab termilise tuule ehk vertikaalse nihke tsonaalse tuule kiiruses. Kui anda sellisele barokliinsele voolule häiritus, tekivad spontaanselt barokliinsed lained ehk tsüklonid ning tsüklonite poolt aetav tsonaalse impulsi voo meriodionaalne konvergens käivitab jugavoolu. Need tulemused näitavad ka seda, et ilma varasema jugavoolu olemasoluta on tsüklonid võimelised jugavoolu spontaanselt tekitama ning et tsüklonid on jugavoolu tekkeks vajalikud (Lee ja Kim, 2003).

Eelnevast võib jääda mulje, et ühest küljest on jugavoolu tekkeks vaja tsükloneid, aga samas on jugavool see, mis tsüklonitel areneda võimaldab. Füüsikaliselt tähendab see seda, et jugavoolu ja tsüklonite vahel on positiivne dünaamiline tagasiside (Lorenz ja Hartmann, 2001; Lorenz ja Hartmann, 2003). Siiski on pöörise olemasolu jugavoolu tekke oluliseks eelduseks (Lee ja Kim, 2003).

Tihti koosneb polaarne jugavool eraldiseisvatest lõikudest, tulenevalt sellest, kus barokliinsus on kõige suurem. Lõigud võivad paikneda eri kõrgustel ja olla erineva kiirusega. Jugavoolude tugevus, asukoht ja tsonaalsus (voolu suund paralleelide suhtes) võib aastast-aastasse märkmisväärselt muutuda ning sellel on suur mõju regionaalsele kliimale (Hall *et al.*, 2015).

### **1.1.3 Polaarne jugavool Põhja-Atlandi sektoris**

Vaatamata erinevatele tekkemehhanismidele ei ole polaarne jugavool ja lähistroopiline jugavool atmosfääri ülemistes kihtides alati selgelt eristatavad (Hall *et al.*, 2015). Kui lähistroopiline jugavool on tugev, siis võivad jugavoolud ühineda, aga kui lähistroopiline jugavool on nõrk ja asub madalamatel laiuskraadidel, siis võivad mõlemad jugavoolud asuda selgelt eraldi (Lee ja Kim, 2003). Põhjapoolkeral on ainult Põhja-Atlandi piirkonnas jugavoolud tavaliselt alati lahus (Hall *et al.*, 2015).

Polaarse jugavoolu asukoha ja tugevusega on seotud suurem osa keskmiste ja kõrgete laiuste atmosfääri kaugseostest (Wittman *et al.*, 2005; Monahan ja Fyfe, 2006). Põhja-Atlandi ostsillatsioon väljendabki tegelikult Põhja-Atlandi tormideraja ja sellega seotud polaarset jugavoolu muutlikkust. NAO positiivse faasi korral lükkavad pööristest lähtuvad impulsivood jugavoolu põhja suunas, eraldades selle selgelt lähistroopilisest jugavoolust. Sellisel juhul on polaarne jugavool tugev ning edela-kerde sihilise kaldega. NAO negatiivse faasi korral on polaarne jugavool ekvaatorile lähemal, pöörise impulsivood on nõrgemad ning polaarne ja lähistroopiline jugavool võivad olla ühinenud (Vallis ja Gerber, 2008; Woollings *et al.*, 2010b). NAO üksi ei kirjelda siiski polaarset jugavoolu muutlikkust terviklikult, olles Põhja-Atlandi dipooli lihtsustatud kirjeldus, mille mõjukeskmed püsivad samas kohas.

Tegelikult liiguvad NAO mõjukeskmed ringi, tulenevalt erinevate muutlikkusrežiimide (Põhja-Atlandi ostsillatsioon NAO, Ida-Atlandi muster EA ja Skandinaavia muster SCA) vastasmõjust (Barnston ja Livezey, 1987; Moore *et al.*, 2013). Kui öeldakse, et erinevad tegurid mõjutavad Põhja-Atlandi ostsillatsiooni, siis tegelikult tähendab see lihtsalt seda, et need tegurid avaldavad mõju tormiderajale ja polaarsele jugavoolule, mis avaldub NAO faasi muutusena (Hall *et al.*, 2015).

Arvestades, et atmosfääri muutlikkusrežiimid (NAO, EA, SCA) omavad suurt mõju Põhja-Euroopa kliimale ning et need režiimid väljendavad tegelikult polaarse jugavoolu olekut, võib järeldada, et polaarse jugavoolu Põhja-Atlandi osa muutlikkus on ülimalt oluline Euroopa ilmaolude kujunemisel (Hall *et al.*, 2015). Ühtlasi mõjub atmosfääri muutlikkuse käsitlemine tuulteväljade kaudu loomulikumana kui rõhu või geopotentsiaali kaudu (Athanasiadis *et al.*, 2010; Woollings *et al.*, 2010a). Erinevalt lähistroopilistest jugavooludest ulatuvad polaarsed jugavoolud vertikaalselt läbi kogu troposfääri ja põhjustavad aluspinnal domineerivaid läänekaare tuuli (O'Reilly *et al.*, 2017). Muutused jugavoolus mõjutavad tormideradasid ja seda, millistesse piirkondadesse jõuavad pehmed ookeanilised õhumassid (Woollings *et al.*, 2018b). Seetõttu on polaarse jugavoolu muutlikkust viimastel aastatel põhjalikult uuritud (näiteks Woollings *et al.* (2010a), Woollings *et al.* (2014), Woollings *et al.* (2018b), Li ja Wettstein (2012), Hall *et al.* (2015) ja O'Reilly *et al.* (2017)).

Kõige olulisem jugavoolu muutlikkuse komponent on meridionaalne nihkumine (Eichelberger ja Hartmann, 2007; Athanasiadis *et al.*, 2010). Näiteks oli 2009/10 väga külm talv Euraasias ja Põhja-Ameerikas põhjustatud jugavoolu äärmuslikult lõunapoolsest asendist, mis püsis enamuse talvest (Cattiaux *et al.*, 2010; Seager *et al.*, 2010). Jugavoolu maksimum asus siis suurema osa ajast 30.-40. laiuskraadi vahel. Vastupidised olud valitsesid 2011/12 talvel, kui jugavoolu maksimum paiknes peamiselt 55nda laiuskraadi ümber (Santos *et al.*, 2013).

Jugavoolul on selge aastaajaline käik, mis tuleneb muutustest polaarfrondis: suvel on polaarfront nõrgem ja poolusele lähemal, talvel on polaarfront tugevam ja poolusest kaugemal, vastavalt käitub ka jugavool (Hall *et al.*, 2015). Küll aga on jugavoolu asukohal tugev hiline mine Päikese aastase käigu suhtes: kõige lõunapoolsem on jugavool pigem märtsist maini, mitte detsembrist veebruarini. Jugavool nihkub suvel põhja poole ja saavutab meridionaalselt kõrgeima asendi septembris. Jugavoolu keskmise asukoha aastase käigu amplituud on aga üsna väike võrreldes asukoha väga suure muutlikkusega üksikute kuude võrdluses, jäädes umbes 5° piiresse. Jugavoolu kiiruse sesoonne käik jälgib Päikese insolatsiooni vahetumalt, olles maksimaalne detsembrist veebruarini. Lisaks sellele, et jugavoolu kiiruse ja asukoha sesoonsed käigud on üsna erinevad, ei ole nende aastateülene muutlikkus korreleeritud. See viitab sellele, et jugavoolu kiirust ja asukohta kujundavad erinevad dünaamilised mõjutajad (Woollings *et al.*, 2014). Siiski on jugavoolu kiirus ja asukoht omavahel seotud: mida kiirem jugavool on, seda

väiksem on jugavoolu asukoha muutlikkus (Woollings *et al.*, 2018b).

Woollings *et al.* (2010a) leidis, et talvel on Põhja-Atlandi polaarsel jugavoolul kolm eelistatud asendit: lõunapoolne asend maksimumiga 37° juures; keskmine asend maksimumiga 47° juures, mida võib tõlgendada jugavoolu häirimata olekuga; ning põhjapoolne asend. Keskmise ja põhjapoolse asendi korral on polaarne jugavool selgelt eristatav lähistroopilisest jugavoolust, lõunapoolse asendi korral on jugavoolud ühinenud. Jugavoolu asendi trimodaalne jaotus paistab olevat jugavoolu püsiv omadus, mis on nähtav ka rohkem kui 100 aasta pikkuses aegreas (Woollings *et al.*, 2014). Madonna *et al.* (2017) leidsid ka jugavoolu neljanda eelistatud oleku, mida iseloomustab ida-lääne sihi suhtes tugevalt kaldu olek või jugavoolu lahknemine mitmeks haruks.

Valitsustevahelise Kliimamuutuste Paneeli (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) viienda raporti põhjal on alates 1970ndatest tõenäoliselt toimunud polaarse jugavoolu ja tormideraja nihkumine poolusele lähemale, ühtlasi on jugavool muutunud kiiremaks (Stocker *et al.*, 2013). Küll aga leidsid Woollings *et al.* (2018b), et lisaks lühemaajalisele muutlikkusele on jugavoolu asukoht ja kiirus muutlikud ka dekaadsetel ajaskaaladel: mitu dekaadi kestvad kiire ja stabiilse jugavoolu perioodid vahelduvad dekaadidega, kus jugavool on aeglane ja muutliku asukohaga ning seetõttu ei paista viimastel aastakümnetel jugavooluga toimunud muutused erakordsed. Polaarse jugavoolu võimalik muutumine tulevikus moodustab olulise osa regionaalsete kliimaprojektsioonide määramatusest (Karpechko, 2010; Deser *et al.*, 2012).

## **1.2 Kliimamuutused Läänemere piirkonnas**

Läänemere piirkonna kliima on soojenenud, kõige enam kevadel ja põhjapoolsematel aladel. Viimastel aastakümnetel on tsüklonaalsed ilmaolud sagenenud ning tormiderajad on nihkunud põhja poole. Maapinnalähedasel tuulel puuduvad pikaajalised trendid, aga esineb suur muutlikkus mitmeaastakümnesel ajaskaalal. Ka sademete puhul puuduvad pikaajalised trendid, aga on märke sajuperioodide pikenemisest ning ekstreemsete sajunähtuste suurenemist tõenäosusest (BACC II autorite meeskond, 2015).

### **1.2.1 Üldised trendid**

Läänemere piirkonnas on kliima soojenenud kiiremini kui globaalne keskmine. Aasta keskmise õhutemperatuuri lineaarne trend perioodil 1871-2011 oli 0,11°C dekaadis 60. laiuskraadist põhja pool ja 0,08°C 60. laiuskraadist lõuna pool. Trendid on suurimad kevadel ning 60. laiuskraadist lõuna pool ka talvel, kõige aeglasem on soojenemine olnud suvel. Ühtlase kasvu asemel on aga esinenud temperatuuri tugev mitmeaastakümne muutlikkus, mis jagab 20.

sajandi kolmeks etapiks: soojenemine kuni 1930ndateni, seejärel jahtumine kuni 1960ndateni, millele on järgnenud kiire soojenemine. Lisaks üldisele soojenemisele toimuvad ka muutused aastaajalisuses: soojade päevade arv ja kasvuperioodi pikkus on suurenenud, samas kui külmade päevade arv ja külma aastaaja pikkus on vähenenud (BACC II autorite meeskond, 2015).

Eestis on perioodil 1951-2015 aasta keskmine õhutemperatuur kasvanud dekaadis  $0,3^{\circ} - 0,4^{\circ}\text{C}$  ning kogu perioodi jooksul  $2^{\circ} - 2,5^{\circ}\text{C}$ , soojenemine on kõige kiirem olnud talvel ja kevadel (Jaagus *et al.*, 2017). Soomes on aastatel 1909-2008 aasta keskmine õhutemperatuur kasvanud  $0,93 \pm 0,72^{\circ}\text{C}$  võrra. Terve selle perioodi peale on soojenemine olnud kiireim kevadel, aga perioodil 1979-2008 on toimunud väga kiire soojenemine talvekuudel, ulatudes  $4,28 \pm 3,44^{\circ}\text{C}$ -ni (Tietäväinen *et al.*, 2010). Norras on perioodi 1900-2014 jooksul aasta keskmine õhutemperatuur kasvanud ligikaudu  $1^{\circ}\text{C}$  võrra ( $0,09^{\circ}\text{C}$  dekaadis), soojenemine on kõige kiirem olnud kevadel ning kõige aeglasem talvel (Hanssen-Bauer *et al.*, 2009). Selle poolest erineb soojenemine Norras üldisest olukorrast Põhja-Euroopas, kus suvi soojeneb kõige aeglasemalt.

Muutused sademetes on 20. sajandi jooksul olnud ebahühtlasemad kui muutused temperatuuris. Osades piirkondades ja osadel aastaaegadel on sademete hulk kasvanud, osades kahanenud (BACC II autorite meeskond, 2015). Euroopa keskmiste sademete aegrida perioodil 1766-2000 iseloomustab suur aastateülene ja mitmeaastakümnene muutlikkus ning pikaajaliste trendide puudumine (Casty *et al.*, 2007). Viimastel aastakümnetel on aga Põhja-Euroopas talvine sademete kogus kasvanud, eelkõige Rootsis ja Läänemere idakaldal (BACC II autorite meeskond, 2015).

20. sajandi teises pooles on Kirde-Atlandi ja Põhja-Euroopa tuulekliimas toimunud olulised muutused (BACC II autorite meeskond, 2015). Perioodil 1958-2009 on tormiderajad nihkunud põhja poole ning see on tõstnud Läänemere piirkonnas talvel ja kevadel tormide sagedust, samas sügisel on tormide sagedus vähenenud. Vastavalt on talvel ja kevadel keskmised tuulte kiirused kasvanud ja sügisel vähenenud (Andreas *et al.*, 2011). Eestis on perioodil 1966-2008 talvekuudel kasvanud läänetuulte osakaal (idatuulte arvelt), tulenevalt tsonaalse õhuvoolu intensiivistumisest Põhja-Atlandi ja Euroopa sektoris (Jaagus ja Kull, 2011). Tuleb aga tähele panna, et uuringud, mis käsitlevad muutusi tuulekliimas alates 20. sajandi teisest poolest, leiavad suuri muutusi, kuna 1960ndatel valitsenud väga rahulikele oludele järgnesid tormised 90ndad. Nii et kuigi selles perioodis esinevad tugevad trendid, siis rohkem kui 150 aasta pikkuste aegridade analüüsid näitavad selgelt aastakümneteülest muutlikkust, mis põhjustab lühemates aegridades trende (BACC II autorite meeskond, 2015).

Suured muutused Läänemere piirkonna tuulekliimas 20. sajandi teises pooles on füüsikaliselt seotud suuremastaapse atmosfäärsirkulatsiooni muutustega Põhja-Atlandil ning Põhja-Atlandi

ostsillatsiooniga. Selles perioodis liikus NAO indeks tugevalt negatiivsetest väärtustest kõrgete väärtuste juurde ning see ilmestab hästi Põhja-Atlandi ostsillatsiooni seotust tormisusega. Põhja-Atlandi ostsillatsiooni tugevnemine ühes selle mõjukeskmete nihkumisega kirdesse tõi Läänemere piirkonda rohkem tugevaid tsükloneid, mis selgitab positiivseid trende talve ja kevade tormisuses (Wang *et al.*, 2006; Andreas *et al.*, 2011; BACC II autorite meeskond, 2015).

## 1.2.2 Aastaaegade nihkumine

Globaalne soojenemine muudab suvesid pikemaks ja talvesid lühemaks. Pikaajalised muutused aastaaegade kestvuses ning algus- ja lõpukuupäevades tulevad välja paljudest vaatlustel põhinevatest uuringutest (Ruosteenoja *et al.*, 2020). Lisaks on vähenenud temperatuuri aastase käigu amplituud, tulenevalt sellest, et talved soojenevad keskmiselt kiiremini kui suved (Jones *et al.*, 2003). Eestis, Lätis ja Lääne-Venemaal on varakevade algus ajaperioodil 1946-1995 nihkunud kuu aega varasemaks. Perioodil 1881-1995 on Ida-Euroopa lauskmaal talve kestvus 1-2 nädala võrra lühenenud (Jaagus *et al.*, 2003). Tartu ilmajaama andmete põhjal on Lõuna-Eestis suvi muutunud 11 päeva võrra pikemaks ja talv 29 päeva võrra lühemaks (Kull *et al.*, 2008). Poolas on perioodil 1951-2010 varakevade, kevade ja suve algused nihkunud varasemaks ning sügise, varase talve ja talve algused on nihkunud hilisemaks. Talve kestvus on vähenenud ligikaudu 40 päeva võrra, suvi on pikenenud umbes 20 päeva võrra ning kasvanud on talve ärajäämise sagedus (Czernecki ja Miętus, 2017). Kogu Euroopa keskmisena on perioodil 1950-2012 suvi pikenenud umbes 15 päeva võrra (Peña-Ortiz *et al.*, 2015). Kogu põhjapoolkera maismaa keskmisena nihkus perioodil 1953-2012 suve algus 15 päeva varasemaks ja suve lõpp 10 päeva hilisemaks, kusjuures kõige suurem muutus on toimunud Euroopas (Park *et al.*, 2018). Siin tuleb küll tähele panna, et erinevad autorid defineerivad aastaaegu erinevalt.

Stine ja Huybers (2012) näitasid, et aastaajalise tsükli ja suuremastaapse atmosfääritsirkulatsiooni vahel on tugev seos ning et vaadeldud trendid aastaajalisuses on lineaarselt ennustatavad atmosfääritsirkulatsiooni muutuste põhjal. Lisaks ilmnes, et sesoonse tsükli faas on enim mõjutatud kevadise tsirkulatsiooni poolt, aga sesoonse tsükli amplituud on mõjutatud peamiselt talvise tsirkulatsiooni poolt. McKinnon *et al.* (2013) leidsid, et temperatuuri aastase käigu ruumiline jaotus on adveptsiooni kaudu määratud maismaa-ookeani seostuse poolt. Mitmed uurimused on püüdnud leida, kui suur osa aastase käigu trendidest on seletatav mingi kindla suuremastaapse atmosfääritsirkulatsiooni muutlikkuse mustri poolt, kõige sagedamini on selleks kasutatud NAMi (Stine *et al.*, 2009; Ault *et al.*, 2011; Stine ja Huybers, 2012; McCabe *et al.*, 2012). Kuna Läänemere piirkond asub suhteliselt kõrgetel laiuskraadidel, on sinne aastaaegade nihkumine ning eriti just talvede kiire soojenemine ja temperatuuri aastase käigu vähenemine seotud ka Arktilise võimendusega (Serreze ja Barry, 2011; Barnes, 2013; Cohen *et al.*, 2014; Coumou *et al.*, 2018). Aastaaegade nihkumises on

tuvastatav ka otsene antropogeenne mõjutus (Drost ja Karoly, 2012; Qian ja Zhang, 2015).

Aastaaegade nihkumise ja suuremastaapse atmosfääritsirkulatsiooni seoseid on enamasti uuritud kogu poolkera mastaabis (Stine *et al.*, 2009; Ault *et al.*, 2011; Stine ja Huybers, 2012; McCabe *et al.*, 2012; Cornes *et al.*, 2017). Regionaalseid uuringuid (Põhja-)Euroopa jaoks on tehtud suhteliselt vähe. Jaagus *et al.* (2003) uurisid tsirkulatsioonirežiimide mõju aastaaegade muutlikkusele Ida-Euroopa lauskmaal. Nende tulemused näitavad, et suuremastaapne atmosfääritsirkulatsioon on antud piirkonnas aastaaegade alguse ja kestvuse peamine määraja. Tsirkulatsiooni mõju on suurim talvel ja varakevadel: tsonaalse õhuvoolu domineerimine on seotud pehmete talvede ja varase kevadega, meridionaalse õhuvoolu domineerimine on seotud külmade talvede ja hilise kevadega. Seosed on kõige tugevamad piirkonna lääneosas. Seos atmosfääritsirkulatsiooni ja suve alguse vahel on väiksem, küll aga on läänetuulte domineerimine seotud hilise suve algusega Balti riikides. Tugevad läänetuuled põhjustavad sügise varase alguse, aga hilissügise ja talve hilinemise. Zveryaev (2007) leidis, et positiivse (negatiivse) NAO indeksi korral on õhutemperatuuri aastase käigu amplituud Euroopas keskmisest väiksem (suurem). Räisänen (2019) uuris atmosfääritsirkulatsiooni mõju sesoonsele tsüklile Soomes ja leidis, et tsirkulatsioonimuutustel on väike mõju aasta keskmise temperatuuri muutusele, aga tsirkulatsioonimuutuste tõttu on temperatuurimuutuste aastane jaotus palju ebaühtlasem. Ruosteenoja *et al.* (2020) uurisid sesoonse tsükli tulevikuprojektsioone Põhja-Euroopas, aga muutusi ei seostatud atmosfääritsirkulatsiooniga.

Eelöeldu põhjal tundub loomulik eeldada, et aastaaegade nihkumine Läänemere piirkonnas tuleneb suuresti muutustest polaarses jugavoolus, aga seda seost ei ole siiani selgelt näidatud. Antud seose analüüsimine ongi käesoleva magistritöö eesmärk.

### 1.3 Magistritöö hüpoteesid

Selleks, et uurida Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu muutuste mõju aastaaegade nihkumisele Läänemere piirkonnas, tuleks kõigepealt veenduda, et analüüsiks kasutatavate andmete põhjal esineb jugavoolus olulisi muutusi ning et need muutused on kooskõlas seniste teadmistega. Seega tuleks kõigepealt vastata järgnevatele küsimustele:

- Kas Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu keskmises asendis ja kiiruses esineb perioodil 01.1950 - 02.2021 statistiliselt olulisi muutuseid?
- Kas ja kuidas on perioodil 01.1950 - 02.2021 muutunud jugavoolu asukoha ja kiiruse aastane käik?

Kuna on teada, et suuremastaapse atmosfääritsirkulatsiooni mõju Läänemere piirkonna ilmale on kõige tugevam talvel (Hurrell, 1995; Hurrell *et al.*, 2003), siis uurimaks polaarse jugavoolu

muutuste mõju aastaegadele nihkumisele, tuleks veenduda, et ka teistel aastaegadel valitseb jugavoolu oleku ja Läänemere piirkonna ilma vahel statistiliselt oluline seos. Seega tuleks vastata küsimusele

- Millistel kuudel on statistiliselt oluline seos Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu keskmise asukoha ja kiiruse ning Läänemere piirkonna keskmise temperatuuri vahel?

Üldiselt on teada, et kõige olulisem jugavoolu muutlikkuse komponent on meridionaalne nihkumine (Eichelberger ja Hartmann, 2007; Athanasiadis *et al.*, 2010). Siiski, kuna polaarse jugavoolu asukohal ja kiirusel on erineva kujuga aastased käigud ja neid mõjutavad erinevad dünaamilised tegurid (Woollings *et al.*, 2014), oleks huvitav võrrelda omavahel jugavoolu asukoha ja kiiruse mõju tugevust ning uurida, kas nende mõjude vahekord aastase käigu jooksul muutub. Tulenevalt sellest, et sügisel pole polaaralad jõudnud veel väga tugevalt jahtuda ning temperatuurierinevus kahel pool polaarfronti on väiksem kui talvel ja kevadel, võib eeldada, et sügisel on olulisem polaarse jugavoolu tugevus ehk ilm Läänemere piirkonnas sõltub eelkõige sellest, kui intensiivselt jugavool merelist õhku Atlandilt siia kannab. Samas talvel ja kevadel, kui temperatuurierinevused kahel pool polaarfronti on väga suured, on tõenäoliselt kõige olulisem jugavoolu asukoht, sest see määrab, kummale poole polaarfronti Läänemere piirkond jääb. Seega võib püstitada järgneva hüpoteesi:

- Sügisel on Läänemere piirkonna ilm mõjutatud peamiselt jugavoolu kiiruse poolt, talvel ja kevadel on olulisem jugavoolu asukoht.

Olles vastanud seni esitatud küsimustele, saab liikuda magistritöö peamiste hüpoteeside juurde, mis olid esitatud ka töö sissejuhatuses:

- Ajaperioodil 01.1950 - 02.2021 on Põhja-Atlandi polaarne jugavool muutunud kiiremaks ja nihkunud põhja poole. Muutused on kõige suuremad talvel ja kevadel ning see põhjustab Läänemere piirkonnas talvede hilisema alguse ja talvede lühenemise, kevade varasema alguse ning temperatuuri aastase käigu amplituudi vähenemise.
- Võrreldes talve ja kevadega on sügisel jugavoolu asukoht ja kiirus muutunud vähe ja/või vastupidises suunas. Selle tõttu on keskmise temperatuuri tõus sügisel olnud mõõdukam kui talvel ja kevadel ning see seletab ka sügiskuudel vähenenud tormisust.

# Peatükk 2

## Andmed ja meetodid

Magistritöös analüüsisin tsonaalse tuule kiirust kõrgemates atmosfäärikihtides ja atmosfääri seisundit aluspinnal iseloomustavaid andmeid perioodil 1950. aasta jaanuarist 2021. aasta veebruarini. Eesmärgiks oli tuvastada polaarsete jugavoolu olek Põhja-Atlandil ja seostada see atmosfääri seisundiga Läänemere piirkonnas. Käesolevas peatükis annan ülevaate magistritöö tehnilisest poolest ehk kasutatud andmetest, andmete töötlemise vahenditest ning jugavoolu tuvastamise meetodist.

### 2.1 Kasutatud andmed

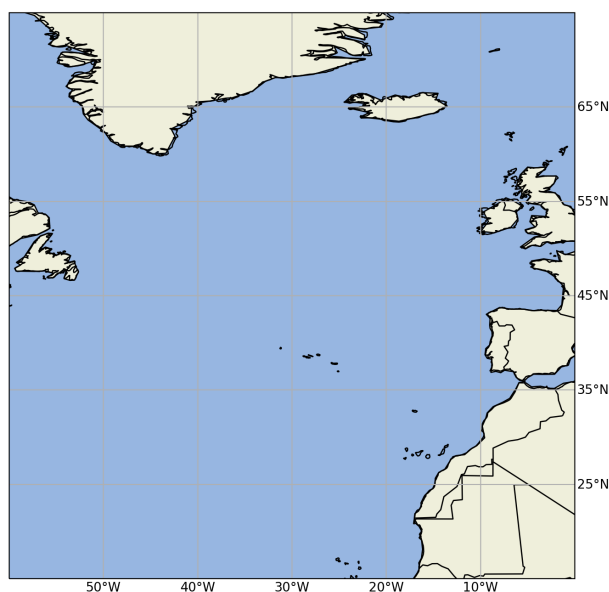
Kasutatud andmed pärinevad Euroopa Keskpika Ilmaennustuse Keskuse (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, ECMWF) poolt koostatud järelanalüüsist ERA5 (Hersbach *et al.*, 2020), mille andmed on allalaetavad Copernicuse kliimaandmebaasist <https://cds.climate.copernicus.eu/>. ERA5 on globaalne järelanalüüs, mis algab 1950. aastast ning millele lisandub jooksvalt uusi andmeid. ERA5 järelanalüüsi andmed on esitatud regulaarsel laiuskraadide-pikkuskraadide võrgustikul sammuga  $0,25^\circ$ . Ajalise sammu jaoks on kasutajal kaks valikut: kas laadida andmed tunniajase ajasammuga või kuukeskmistena. Ma kasutasin kuukeskmiseid andmeid, sest tunniajaste andmete kasutamise korral oleksid andmemahud liiga suureks läinud. Andmed laadisin alla järgnevatest Copernicuse kliimaandmebaasi andmekogumitest:

- ERA5 kuukeskmised andmed aluspinnal alates 1979. aastast kuni praeguseni (Hersbach *et al.*, 2019b);
- ERA5 kuukeskmised andmed aluspinnal alates 1950. aastast kuni 1978. aastani (esialgne versioon) (Bell *et al.*, 2020b);

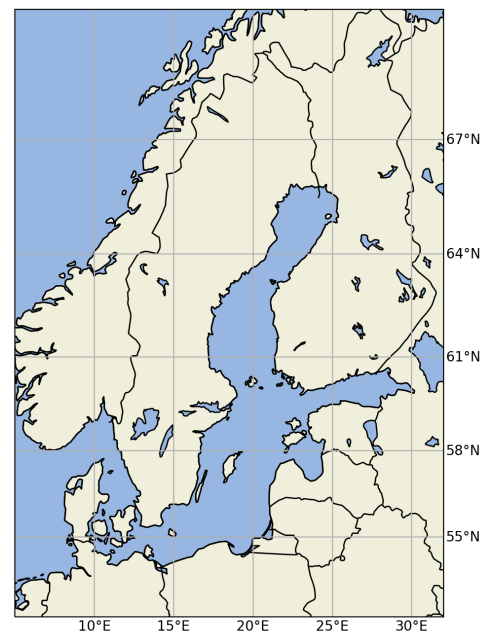


- ERA5 kuukeskmised andmed rõhutasemetel alates 1979. aastast kuni praeguseni (Hersbach *et al.*, 2019a);
- ERA5 kuukeskmised andmed rõhutasemetel alates 1950. aastast kuni 1978. aastani (esialgne versioon) (Bell *et al.*, 2020a).

Parameetrid, mille andmeid analüüsisin, on tuule kiiruse kuukeskmise tsonaalne komponent rõhutasemetel 700, 750, 775, 800, 825, 850, 875, 900, 925 hPa; kuukeskmise temperatuur aluspinnast 2 meetri kõrgusel; kuukeskmise merepinnale taandatud õhurõhk; kuukeskmise sademete kogus. Lisaks temperatuurile valisin Läänemere piirkonna ilma iseloomustamiseks sademete koguse ja õhurõhu, sest neid parameetreid on võimalik tõhusalt ajas ja ruumis keskmistada. Aluspinnalähedasi tuuli ei saa nii hästi suure ala peale keskmistada ja seega pole neid antud töös analüüsitud. Andmed laadisin alguses alla kogu põhjapoolkera jaoks ning seejärel eraldasin andmetest kaks geograafilist piirkonda: Põhja-Atlandi sektori ( $15^{\circ} - 75^{\circ}\text{N}$ ,  $60^{\circ}\text{W} - 0^{\circ}$ ) ning Läänemere piirkonna ( $52^{\circ} - 70^{\circ}\text{N}$ ,  $5^{\circ} - 32^{\circ}\text{E}$ ). Antud piirkonnad on näidatud joonisel 2.1. Andmeid hoiustasin ja arvutusi teostas in Tartu Ülikooli Teadusarvutuste keskuse poolt hallatavas rocketi arvutiklastris (Tartu Ülikool, 2018).



(a) Põhja-Atlandi piirkond



(b) Läänemere piirkond

Joonis 2.1: Defineeritud Põhja-Atlandi (a) ja Läänemere (b) piirkonnad.

Andmete esmaseks töötlemiseks otse käsureaal kasutasin paketti Climate Data Operators ehk CDO (Schulzweida, 2019). Keerulisemate arvutuste tegemiseks ja graafikute joonistamiseks kasutasin Pythoni programmeerimiskeelt (Van Rossum ja Drake, 2009), kus netCDF-formaadis järelanalüüsi andmeid lugesi sisse paketiga netCDF4 (<https://unidata.github.io/>

netcdf4-python/#version-157), arvutusi tegin pakketidega NumPy (Harris *et al.*, 2020) ja SciPy (Virtanen *et al.*, 2020) ning graafikuid joonistasin Matplotlibi (Hunter, 2007) ja Cartopyga (Met Office, 2010-2015). Lineaarsete regressioonide/trendide, korrelatsioonikordajate ja statistilise olulisuse arvutamiseks kasutasin SciPy funktsiooni `scipy.linreg()`.

## 2.2 Jugavoolu tuvastamise meetod

Jugavoolu tuvastamise meetodi idee pärineb Tim Woollingsi artiklist Woollings *et al.* (2010a). Eesmärk on analüüsida polaarset jugavoolu, eristades seda lähistroopilisest jugavoolust, kuna just polaarsel jugavoolul on väga oluline mõju Läänemere piirkonna ilmale (Hurrell, 1995; Hurrell *et al.*, 2003; Jaagus *et al.*, 2003; Zveryaev, 2007; Woollings *et al.*, 2008; Vallis ja Gerber, 2008; Hall *et al.*, 2015; BACC II autorite meeskond, 2015). Troposfääri ülemistes kihtides võivad polaarne jugavool ja lähistroopiline jugavool olla ruumiliselt eristamatud (Hall *et al.*, 2015), aga erinevalt lähistroopilisest jugavoolust ulatub polaarne jugavool vertikaalselt läbi kogu troposfääri (O'Reilly *et al.*, 2017). Seega on polaarset jugavoolu võimalik edukalt tuvastada, kui analüüsida madalamaid atmosfäärikihte (Woollings *et al.*, 2010a).

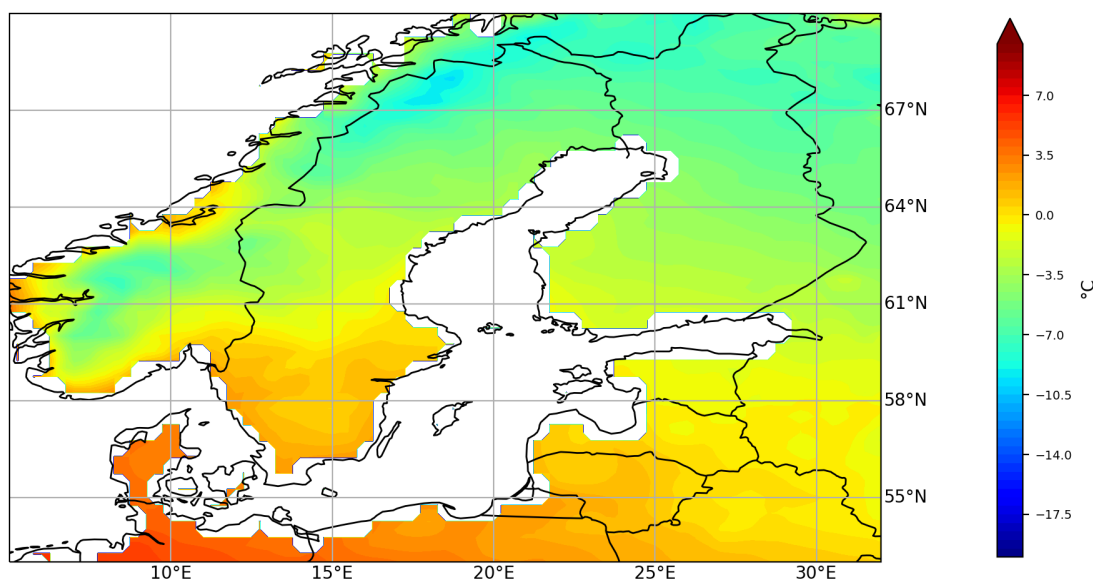
Jugavoolu tuvastamise algoritm näeb välja järgmine:

1. Keskmistasin Põhja-Atlandi piirkonna kuukeskmised tsonaalse tuule kiirused vertikaalselt üle rõhutasete 700, 750, 775, 800, 825, 850, 875, 900 ja 925 hPa;
2. Saadud keskmistatud tuule välja keskmistasin tsonaalselt mööda paralleele, tulemuseks ühemõõtmeline vektor vertikaalselt ja tsonaalselt keskmistatud tuule kiirustega;
3. Antud vektorist otsisin välja maksimaalse tuule kiiruse ja leidsin sellele vastava meridionaalse koordinaadi ehk laiuskraadi.

Selle meetodi tulemuseks on kaks polaarset jugavoolu olekut kirjeldavat indeksit: jugavoolu kiirus ja jugavoolu asukoht. Jugavoolu asukoht tähendab laiuskraadi, kus keskmistatud tsonaalse tuule kiirus on kõige suurem. Antud meetod on robustne mitmete variatsioonide suhtes, ainus tulemusi oluliselt mõjutav faktor on uuritava sektori tsonaalse ulatuse valik (Woollings *et al.*, 2010a). Sellised lihtsad indeksid väljendavad füüsikaliselt Põhja-Atlandi suuremastaapse atmosfäärtsirkulatsiooni nähtustega (nagu näiteks Põhja-Atlandi ostsillatsiooniga) seotud keskmise tsonaalse voolu muutlikkust. Tuleb aga meeles pidada, et kui vaadata jugavoolu mõnel kindlal ajahetkel, võib selles esineda märkimisväärne meridionaalne struktuur, mis antud meetodiga välja ei tule (Woollings *et al.*, 2014). Kuna aga Põhja-Euroopa ilma jaoks on kõige olulisem tsonaalse voolu tugevus (Hurrell, 1995; Hurrell *et al.*, 2003; Vallis ja Gerber, 2008), siis võib eeldada, et ka ainult jugavoolu tsonaalset komponenti vaadates on jugavoolu mõju Läänemere piirkonna ilmale selgelt näha.

## 2.3 Statistilised meetodid

Jugavoolu asukoha ja kiiruse seost Läänemere piirkonna ilmaga iseloomustan korrelatsioonikordajate ja statistilise olulisuse kaudu. Parameetrite hajuvuse iseloomustamiseks kasutan standardhälvet ning lineaarseid trende loen oluliseks, kui statistilise olulisuse parameeter  $p < 0,05$ . Korrelatsioonikordajate arvutamisel kasutan teatud juhtudel suhtelisi anomaaliad, mis tähendab, et anomaaliad ehk kõrvalekalded keskvärtusest on standardhõlbega läbi jagatud. Läänemere piirkonna kuukeskmiseid temperatuure, sademete koguseid ja õhurõhkusid iseloomustan kogu ala keskmiste kaudu. Ala keskmised arvutan ainult maismaad katvate võrgurutuutude põhjal, sest mere suure termilise inertsit tõttu toimub soojenemine merel aeglasemalt ning merealade kaasamine piirkonna temperatuuri keskmiste arvutamisse summutaks soojenemise signaali. Parema võrreldavuse huvides jätsin merealad välja ka sademete ja õhurõhu keskmiste arvutamisel. Joonis 2.2 illustreerib, millise ala andmed Läänemere piirkonnas arvutustesse sisse lähevad.



Joonis 2.2: Märtsi keskmine temperatuur perioodil 1991-2020 Läänemere piirkonnas

Erinevate suuruste aastaseid käike ja nende muutumist iseloomustan kahe 30-aastase perioodi põhjal arvutatud keskmise aastase käigu kaudu. Esimene periood on valitud andmeseeria algusest (1950-1979) ja teine periood on valitud andmeseeria lõpust (1991-2020). See võimaldab tõhusalt näha, kas ja kuidas on pikaajalised keskmised uuritava ajaperioodi 01.1950 - 02.2021 jooksul muutunud. Kõikides aastaseid käike kujutavates või andmeid kuude kaupa esitavates graafikutes ja tabelites on x-telg nihutatud nii, et aastane käik algab augustist ja lõppeb juulis. See võimaldab paremini jälgida graafiku käitumist perioodil sügisest kevadeni ehk ajal, millal polaarsete jugavoolude mõju Läänemere piirkonna ilmale on kõige tugevam.

## Peatükk 3

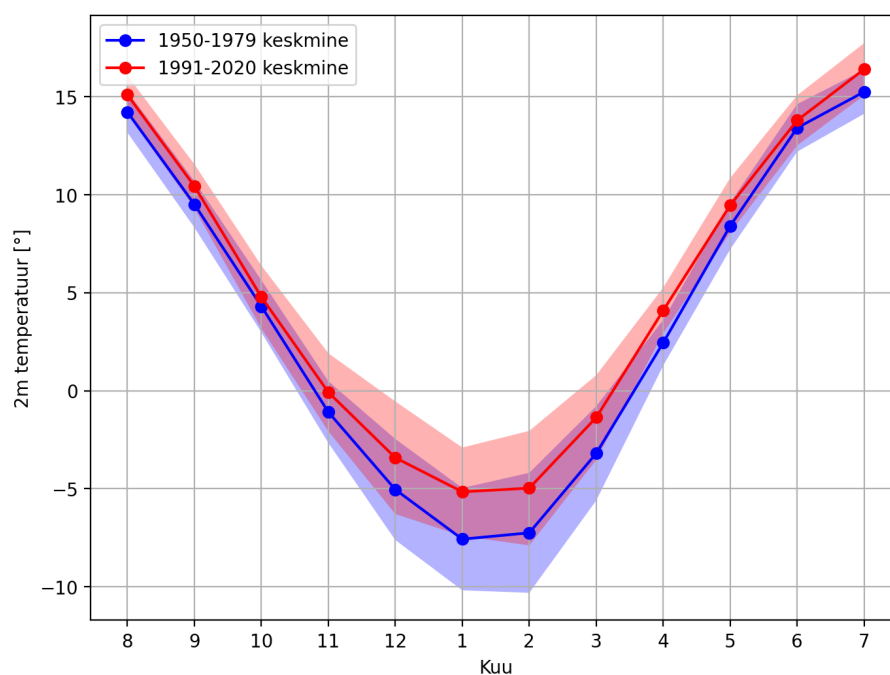
### Tulemused ja arutelu

Käesoleva peatüki esimeses alapeatükis annan ülevaate kuukeskmiste temperatuuride, sademete koguste ja õhurõhkude muutustest Läänemere piirkonnas perioodil 01.1950 - 02.2021 ERA5 järelanalüüsi põhjal. Teises alapeatükis näitan, kui tugevad seosed valitsevad Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu asukoha ja kiiruse ning Läänemere piirkonna ilma vahel. Kolmandas alapeatükis analüüsin, kas ja kuidas on antud perioodi jooksul polaarse jugavoolu asukoht ja kiirus muutunud. Nende tulemuste põhjal saan vastata varasemalt püstitatud uurimisküsimustele ning kinnitada või ümber lükata magistritöö hüpoteesid.

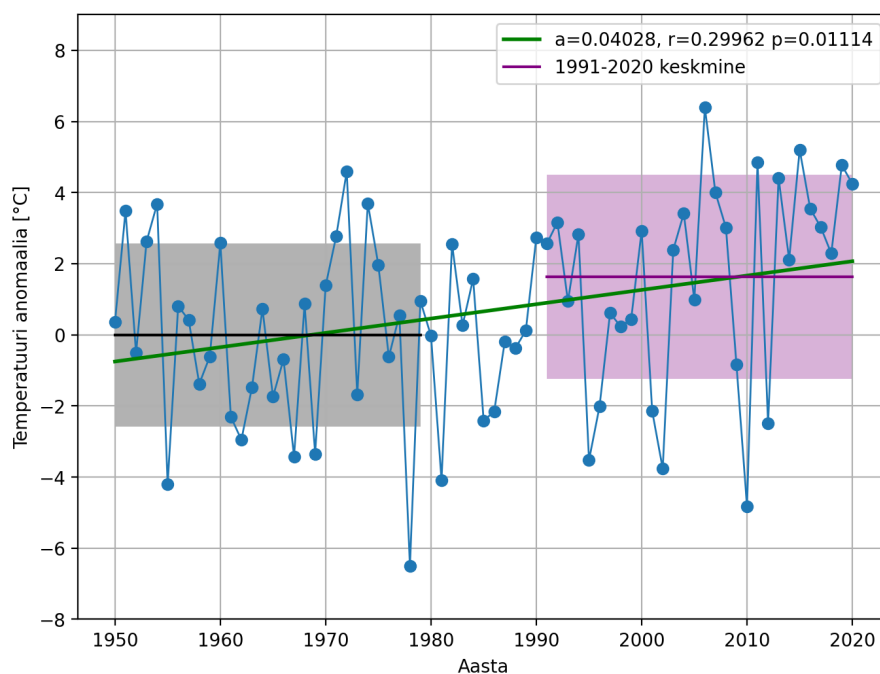
#### 3.1 Temperatuur, sademed ja õhurõhk

Joonisel 3.1 on esitatud kuukeskmise temperatuuri aastased käigud, mis on arvutatud kahe 30 aasta pikkuse perioodi põhjal, nagu on kirjeldatud peatükis 2.3. Kõige kiirem soojenemine on toimunud talvel ja kevade alguses ehk detsembris, jaanuaris, veebruaris ja märtsis, mis on vähendanud temperatuuri aastase käigu amplituudi. Märtsis ja aprillis on temperatuur tõusnud rohkem kui sügiskuudel. Need tulemused on kooskõlas varasemate teadmistega Läänemere piirkonna kliima soojenemisest (BACC II autorite meeskond, 2015). Joonis 3.1 iseloomustab ka temperatuuri muutlikkuse aastast käiku Läänemere piirkonnas: kuu keskmise temperatuuri standardhälve on novembrist märtsini märkimisväärselt suurem kui ülejäänud aasta jooksul.

Illustreerimaks temperatuuri muutumist ja aastatevahelist muutlikkust perioodil 1950-2020, on joonisel 3.2 näidatud detsembrikuu keskmise temperatuuri anomaaliate aegrida. Esitamiseks on valitud detsember tulenevalt talvede hilisemaks nihkunud algusest. Lineaarse trendi põhjal on detsembri keskmine temperatuur kasvanud  $0,4^{\circ}\text{C}$  dekaadis. Huvitava asjaoluna torkab silma, et aegrea viimase kaheksa aasta jooksul (2013-2020) on detsembri keskmise temperatuuri muutlikkus olnud keskmisest väiksem ning temperatuurid on olnud keskmisest soojemad.

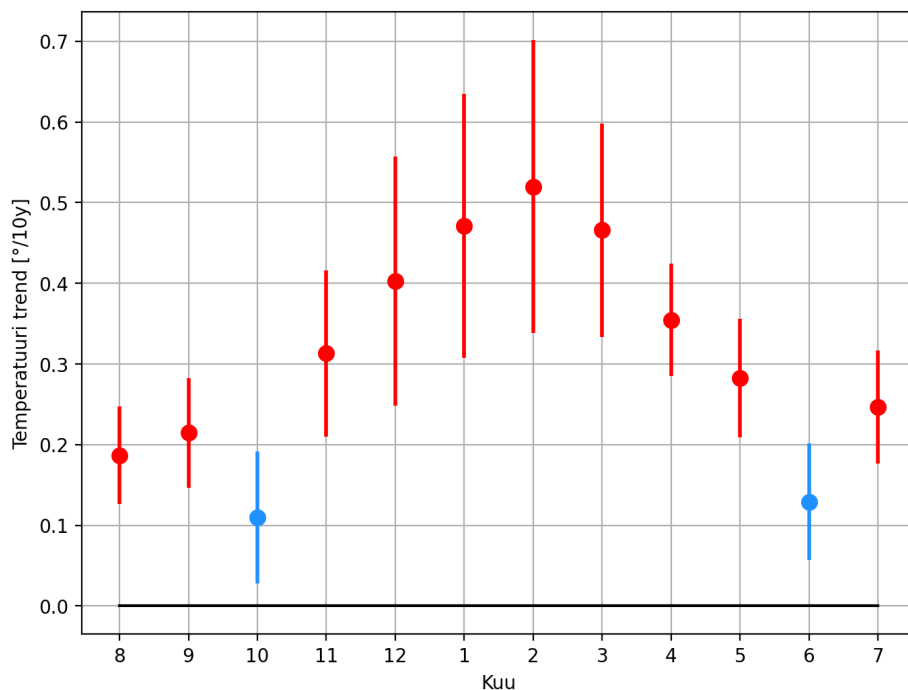


Joonis 3.1: Läänemere piirkonna kuukeskmise temperatuuri keskmine aastane käik perioodidel 1950 - 1979 ja 1991 - 2020. Poolläbipaistev värvitud tsoon keskmise väärtuse ümber näitab standardhälvet, mis iseloomustab temperatuuri aastatevahelist hajuvust.



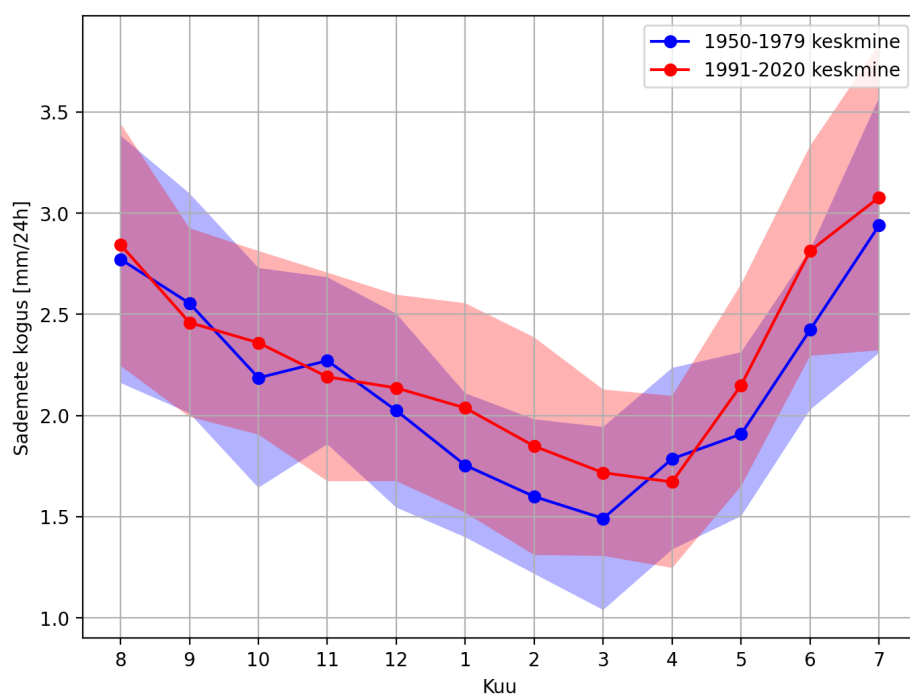
Joonis 3.2: Detsembri keskmise temperatuuri anomaaliad Läänemere piirkonnas aastatel 1950-2020 (perioodi 1950 - 1979 keskmise temperatuuri suhtes). Siin  $a$  näitab temperatuuri muutust ühe aasta kohta lineaarse trendi järgi,  $r$  on korrelatsioonikordaja ja  $p$  on lineaarse trendi statistiline olulisus.

Joonis 3.3 näitab, et statistiliselt oluline keskmise temperatuuri kasv esineb kõikides kuudes peale oktoobri ja juuni, ulatudes ligikaudu  $0,2^{\circ}\text{C}$  dekaadi kohta augustis kuni  $0,5^{\circ}\text{C}$  dekaadi kohta veebruaris. Soojenemise kiirus on maist oktoobrini väiksem kui  $0,3^{\circ}\text{C}$  dekaadis, novembrist aprillini suurem kui  $0,3^{\circ}\text{C}$  dekaadis. Oluliste trendide puudumine oktoobris ja juunis lõhub graafiku üldiselt suhteliselt siledat kuju ja tuleks uurida, kas see on seotud erisustega atmosfäärsirkulatsioonis.

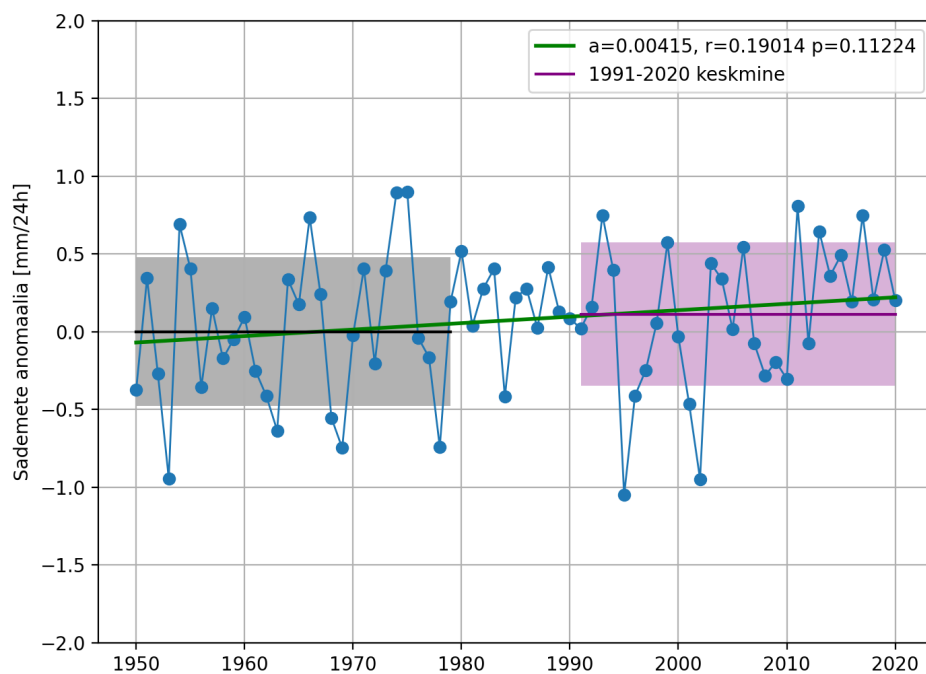


Joonis 3.3: Kuu keskmiste temperatuuride lineaarsed trendid Läänemere piirkonnas perioodil 01.1950 - 02.2021. Statistiliselt olulised trendid on värvitud punaseks.

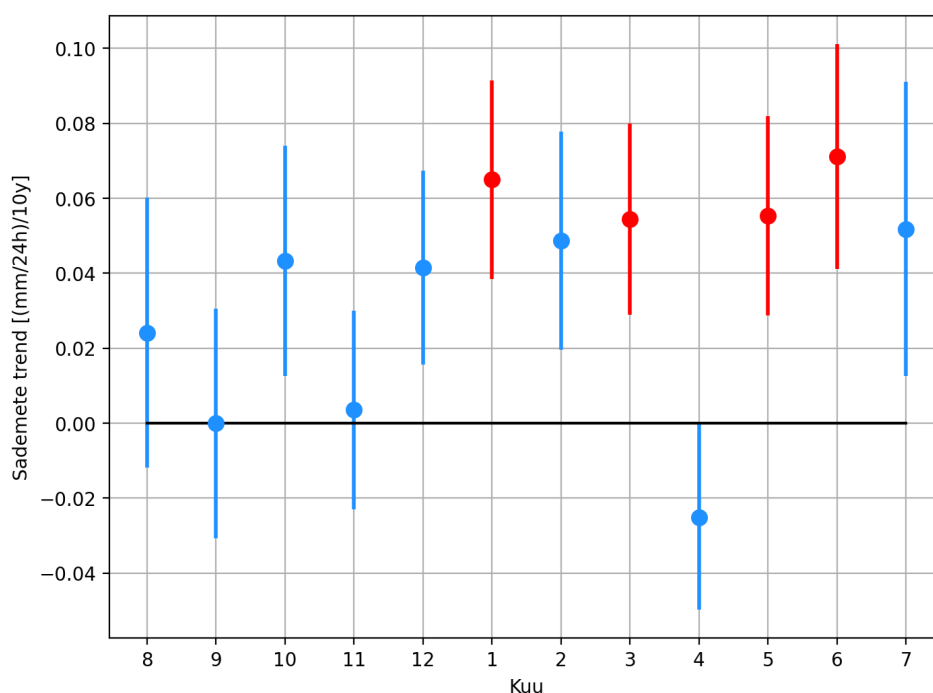
Joonise 3.4 põhjal saab järeldada, et sademete koguse aastase käigu amplituudis olulisi muutusi pole, aga aastase käigu miinimum on nihkunud märtsist aprilli. Võrreldes temperatuuriga on sademete muutlikkuse aastane käik ühtlasem ehk standardhälve muutub aasta jooksul vähem. Huvitav on aga, et aastatel 1991-2020 on jaanuaris ja veebruaris sademete koguse aastatevaheline muutlikkus olnud märgatavalt suurem kui perioodil 1950-1979. Joonisel 3.5 on analoogselt joonisega 3.2 toodud detsembrikuu sademete koguse anomaaliade aegrida, kus on näha keskmisest suurema sademete kogusega ja keskmisest väiksema muutlikkusega periood aastatel 2013-2020, mis kattub eespool mainitud stabiilse temperatuuri perioodiga. Jooniselt 3.6 selgub, et sademete kogus on statistiliselt olulisel määral kasvanud jaanuaris, märtsis, mais ja juunis. Ainus negatiivse muutusega kuu on aprill.



Joonis 3.4: Läänemere piirkonna kuukeskmise 24h sademete koguse keskmine aastane käik perioodidel 1950 - 1979 ja 1991 - 2020. Poolläbipaistev värvitud tsoon keskmise väärtuse ümber näitab standardhälvet, mis iseloomustab sademete koguse aastatevahelist hajuvust.



Joonis 3.5: Detsembri kuukeskmised 24h sademete anomaaliad Läänemere piirkonnas aastatel 1950-2020 (perioodi 1950 - 1979 keskmise suhtes).

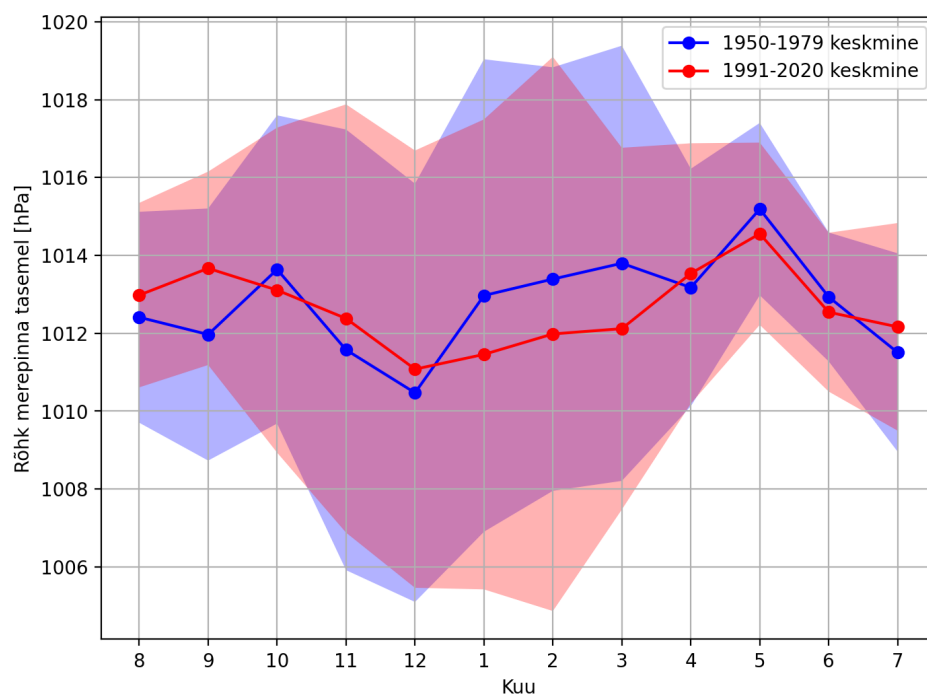


Joonis 3.6: Kuukeskiste 24h sademete koguste lineaarsed trendid Läänemere piirkonnas perioodil 01.1950 - 02.2021. Statistiliselt olulised trendid on värvitud punaseks.

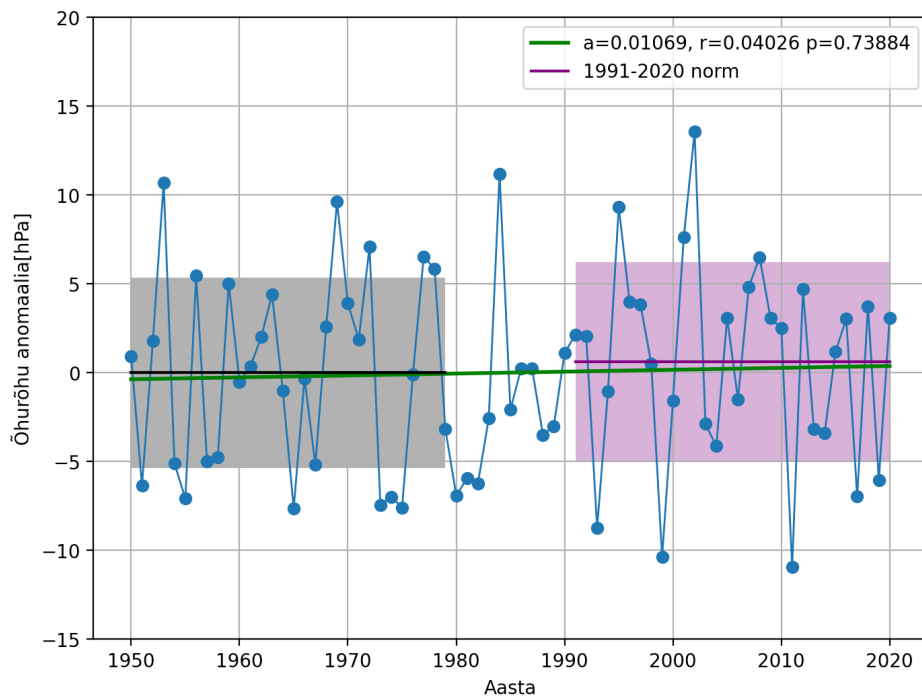
Joonis 3.7 näitab, et kuukeskisel merepinnale taandatud õhurõhul on oktoobrist märtsini väga suur muutlikkus, aga siiski võib öelda, et on toimunud mõningane keskmise õhurõhu vähenemine jaanuaris, veebruaris ja märtsis ning keskmise õhurõhu kasv septembris. Natuke on vähenenud õhurõhu aastase käigu amplituud. Õhurõhu langus jaanuarist märtsini on ka ootuspärane, sest see viitab intensiivsemaks muutunud tsonaalsele õhuvoolule, mis toob Atlandilt rohkem tsükloneid ning niisket ja sooja õhku Läänemere piirkonda.

Joonis 3.8 iseloomustab õhurõhu väga suurt muutlikkust: detsembri keskmiste õhurõhkude ekstremaalsed väärtused erinevad peaaegu 25 hPa võrra. Suure muutlikkuse tõttu puuduvad statistiliselt olulised lineaarsed trendid: jooniselt 3.9 selgub, et õhurõhu kasv septembris on ainuke statistiliselt oluline muutus (peaaegu 0,4 hPa dekaadis) keskmises õhurõhus perioodil 01.1950 - 02.2021. Kuigi märtsis on umbes sama tugev negatiivne trend, siis suure muutlikkuse tõttu ei ole see siiski statistiliselt oluline.

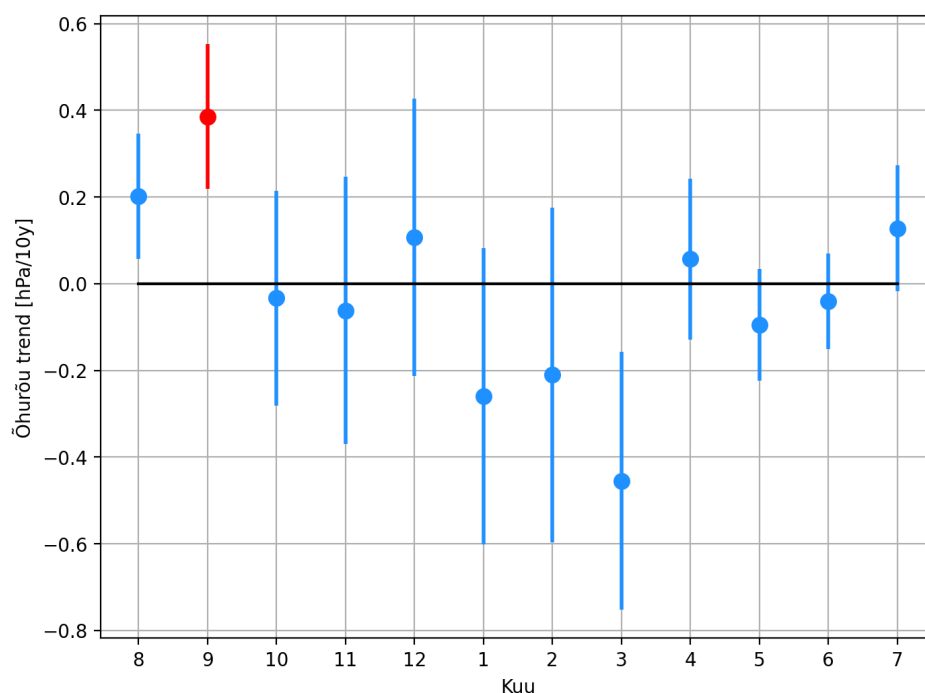




Joonis 3.7: Läänemere piirkonna kuu keskmise merepinna taandatud õhurõhu [hPa] aastane käik perioodidel 1950-1979 ja 1991-2020. Poolläbipaistev värvitud tsoon keskmise väärtuse ümber näitab standardhälvet, mis iseloomustab õhurõhu aastatevahelist hajuvust.



Joonis 3.8: Detsembri keskmised merepinna taandatud õhurõhu anomaaliad Läänemere piirkonnas perioodil 1950-2020 (1950-1979 keskmise suhtes)



Joonis 3.9: Läänemere piirkonna kuukeskmiste merepinnaale taandatud õhurõhkude lineaarsed trendid perioodil 01.1950 - 02.2021. Statistiliselt olulised trendid on värvitud punaseks.

Käesoleva alapeatüki tulemused võtab kokku tabel 3.1. Ootuspäraselt on väga selged muutused toimunud temperatuuris ning soojenemine on kõige tugevam olnud talvekuudel ja märtsis. Samuti on ootuspärane sademete koguse kasv jaanuaris ja märtsis. Õhurõhu statistiliselt oluline kasv septembris on tõenäoliselt seotud sügisel vähenenud tormisusega, aga kindlate järelduste tegemiseks on see näitaja liiga üldine ning antud muutuse põhjused vajaksid pikemat uurimist. Ühe kõige huvitavama asjaoluna hakkab silma väike ja statistiliselt ebaoluline temperatuuri tõus oktoobris ja juunis.

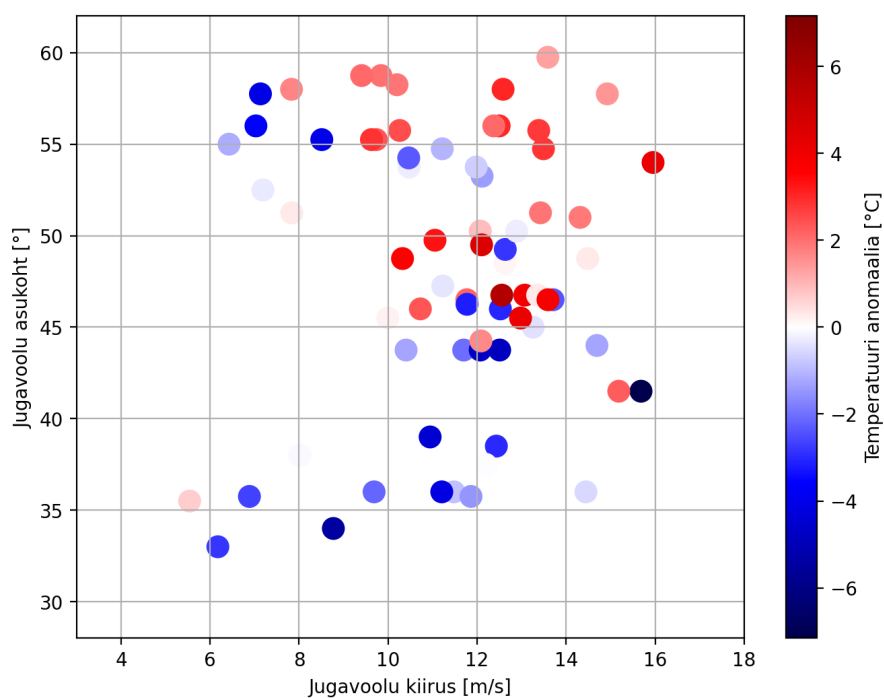
Tabel 3.1: Temperatuuri, sademete ja õhurõhu kuukeskmiste väärtuste muutused Läänemere piirkonnas perioodil 01.1950 - 02.2021 lineaarsete trendide põhjal koos standardhälbega. Statistiliselt olulised muutused on paksus kirjas.

Kuu	Temperatuur [°C]	Sademed [mm/kuus]	Õhurõhk [hPa]
August	<b>1,3±0,4</b>	5,3±8,1	1,4±1,0
September	<b>1,5±0,5</b>	-0,0±6,6	<b>2,7±1,2</b>
Oktoober	0,8±0,6	9,6±6,8	-0,2±1,8
November	<b>2,2±0,7</b>	0,9±5,7	-0,4±2,2
Detsember	<b>2,9±1,1</b>	9,0±5,6	-0,8±2,3
Jaanuar	<b>3,4±1,2</b>	<b>14,6±5,9</b>	-1,9±2,5
Veebruar	<b>3,7±1,3</b>	9,9±5,9	-1,5±2,8
Märts	<b>3,3±0,9</b>	<b>12,1±5,6</b>	-3,2±2,1
Aprill	<b>2,5±0,5</b>	-5,4±5,4	0,4±1,3
Mai	<b>2,0±0,5</b>	<b>12,1±5,9</b>	-0,7±0,9
Juuni	0,9±0,5	<b>15,0±6,3</b>	-0,3±0,8
Juuli	<b>1,7±0,5</b>	11,5±8,7	0,9±1,0

### 3.2 Seosed jugavoolu oleku ja Läänemere piirkonna ilma vahel

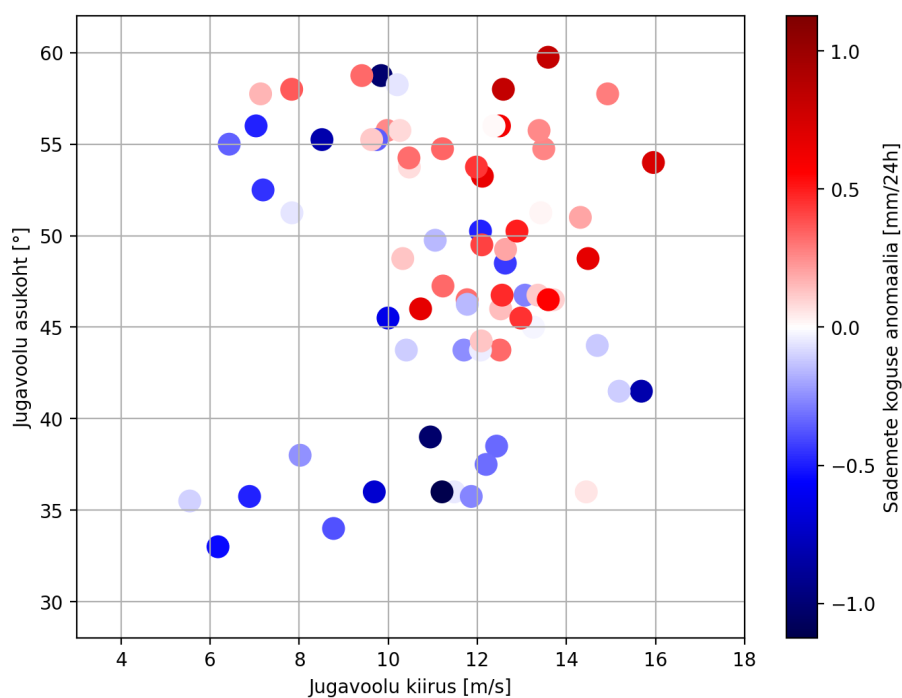
Käesolevas alapeatükis analüüsin, millised ja kui tugevad seosed valitsevad Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu asukohta ja kiiruse ning Läänemere piirkonna õhutemperatuuri, sademete koguse ja õhurõhu vahel. Nii nagu eelmises alapeatükis, kasutan ka seekord näidiskuuna detsembrit, mille jaoks teostan põhjaliku seoste analüüsi koos graafikutega. Ruumi kokkuhoiu huvides pole teiste kuude kohta käivad graafikuid esitatud, aga analoogsed tulemused ka kõikide teiste kuude jaoks on kokku võetud tabelis 3.2.

Jooniselt 3.10 hakkab silma jugavoolu olekute jaotumine kolme gruppi: 1) lõunapoolne asukoht ja pigem aeglane kiirus; 2) keskmine asukoht; 3) põhjapoolne asukoht. Jugavoolu olekute selline jaotumine on kvalitatiivselt kooskõlas varasemate tulemustega (Woollings *et al.*, 2010a; Hannachi *et al.*, 2012). Graafikult tuleb selgelt välja, et lõunapoolse ja/või aeglase jugavoolu korral on detsember enamasti olnud keskmisest külmem. Kui jugavool on olnud põhjapoolses asendis, on detsember valdavalt olnud keskmisest soojem, välja arvatud siis, kui jugavoolu kiirus on olnud väike. Keskmises asendis, mida võib nimetada ka jugavoolu põhiasendiks või häirimata asendiks (Woollings *et al.*, 2010a), on esinenud nii sooje kui külmi detsembreid, seega antud juhul mängivad olulisemat rolli ka teised tegurid.

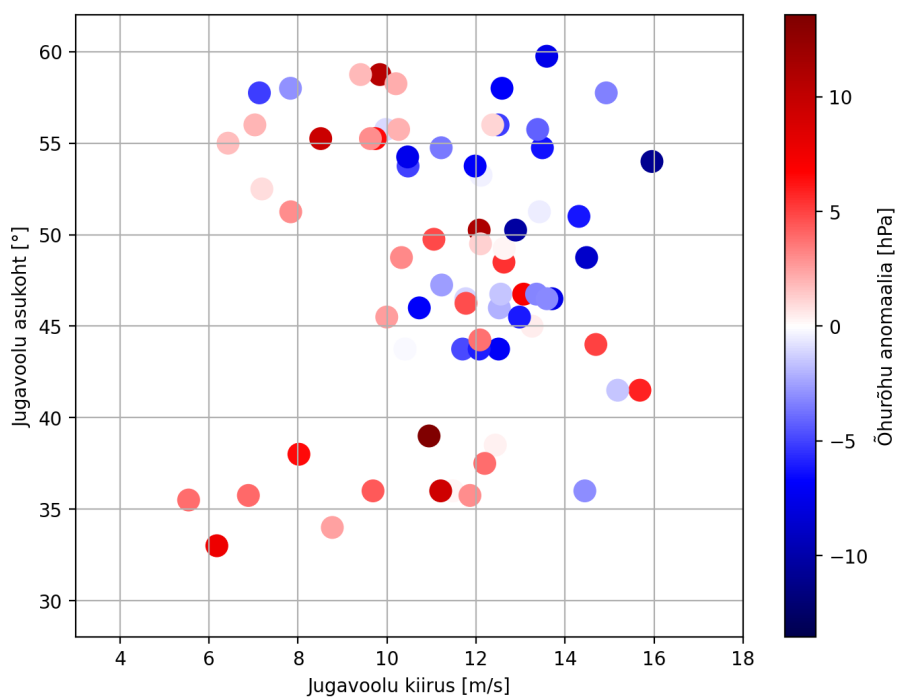


Joonis 3.10: Seos Põhja-Atlandi jugavoolu kuukeskmise asukoha ja kiiruse ning Läänemere piirkonna kuukeskmise temperatuuri vahel detsembris perioodil 1950-2020. Värv näitab temperatuuri anomaaliaid kõikide aastate keskmise suhtes.

Jooniselt 3.11 selgub, et väga sarnased seosed valitsevad ka jugavoolu asukoha ja kiiruse ning Läänemere piirkonna keskmise sademete koguse vahel, ehk enamasti on ilm detsembrikuus kas külm ja kuiv või soe ja sajune, mis on ootuspärane tulemus. Joonisel 3.12 on esitatud analoogne graafik õhurõhu kohta ning samuti ootuspäraselt on õhurõhu puhul seos vastasmärgiline: kui jugavool on lõunapoolses asendis ning Läänemere piirkonnas on külm ja kuiv, on siin ka keskmisest kõrgem õhurõhk, ning kui jugavool on põhjapoolses asendis ning Läänemere piirkonnas on soe ja sajune, on ka õhurõhk keskmisest madalam.



Joonis 3.11: Seos Põhja-Atlandi jugavoolu kuukeskmise asukoha ja kiiruse ning Läänemere piirkonna kuukeskmise sademete koguse vahel detsembris perioodil 1950-2020. Värv näitab sademete koguse anomaaliat kõikide aastate keskmise suhtes.

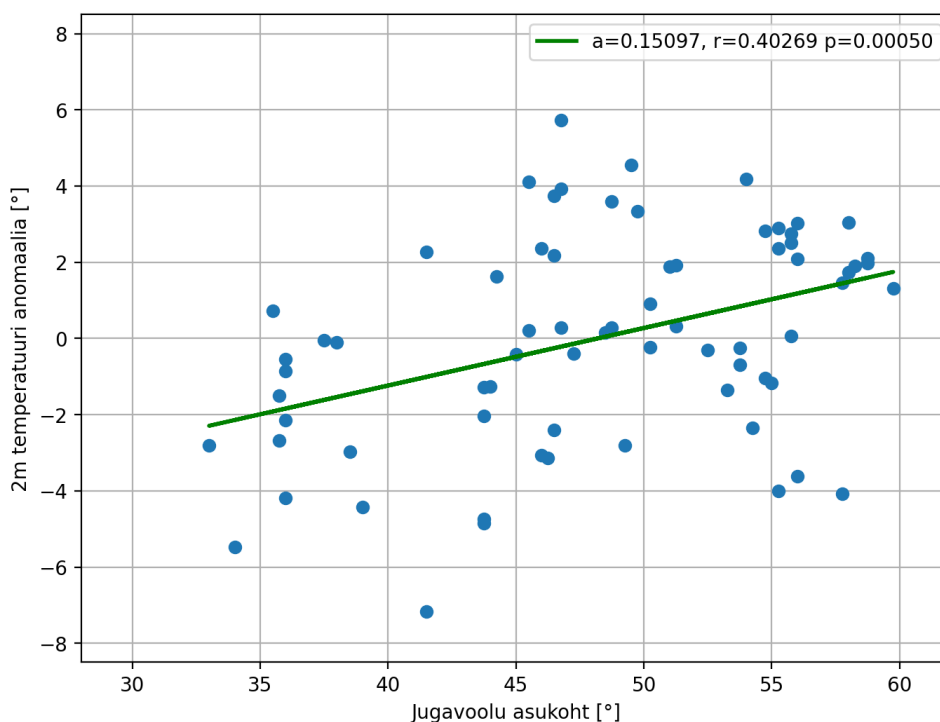


Joonis 3.12: Seos Põhja-Atlandi jugavoolu kuukeskmise asukoha ja kiiruse ning Läänemere piirkonna kuukeskmise õhurõhu vahel detsembris perioodil 1950-2020. Värv näitab õhurõhu anomaaliat kõikide aastate keskmise suhtes.

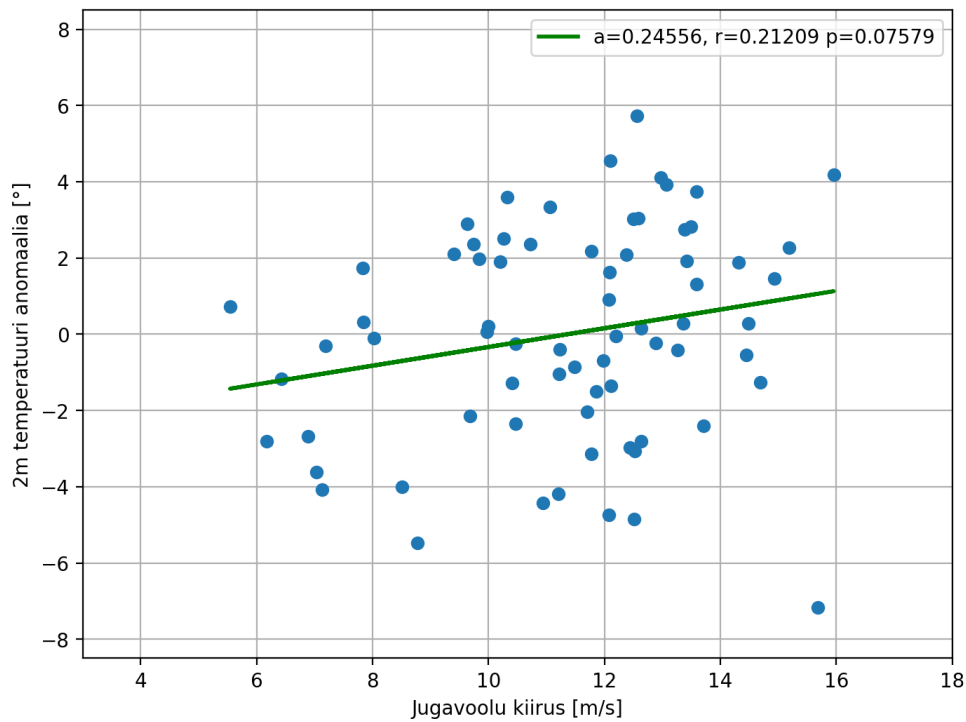
Analüüsin nüüd detailsemalt, kui suur on on detsembri keskmise temperatuuri korrelatsioon jugavoolu asukohaga, jugavoolu kiirusega ning asukoha ja kiiruse koosmõjuga, mida väljendab nende suhteliste anomaaliate summa. Joonisel 3.13 on esitatud jugavoolu asukoha ja Läänemere piirkonna temperatuuri korrelatsioonigraafik koos lineaarse regressiooniga. Antud suuruste vahel on statistiliselt oluline korrelatsioon ning korrelatsioonikordaja väärtus on  $r = 0,403$ . Jooniselt 3.14 selgub, et korrelatsioon jugavoolu kiirusega pole statistiliselt oluline ning korrelatsioonikordaja väärtus on ainult,  $r = 0,212$ . See tähendab, et detsembrikuus on jugavoolu asukohal selgelt tugevam mõju Läänemere piirkonna temperatuurile kui jugavoolu kiirusel.

Joonise 3.15 põhjal võib öelda, et jugavoolu asukoha ja kiiruse kombineerimine korrelatsiooni tugevust eriti ei tõsta: korrelatsioonikordaja on nüüd  $r = 0,431$ . Küll aga on nüüd visuaalselt selgemini näha, et sarnaselt joonisega 3.10 on jugavoolu põhioleku ümber temperatuuril suur hajuvus, aga aeglase ja lõunapoolsete jugavoolude korral on temperatuurid olnud keskmisest külmemad ning kiirete ja põhjapoolsete jugavoolude korral keskmisest soojemad.

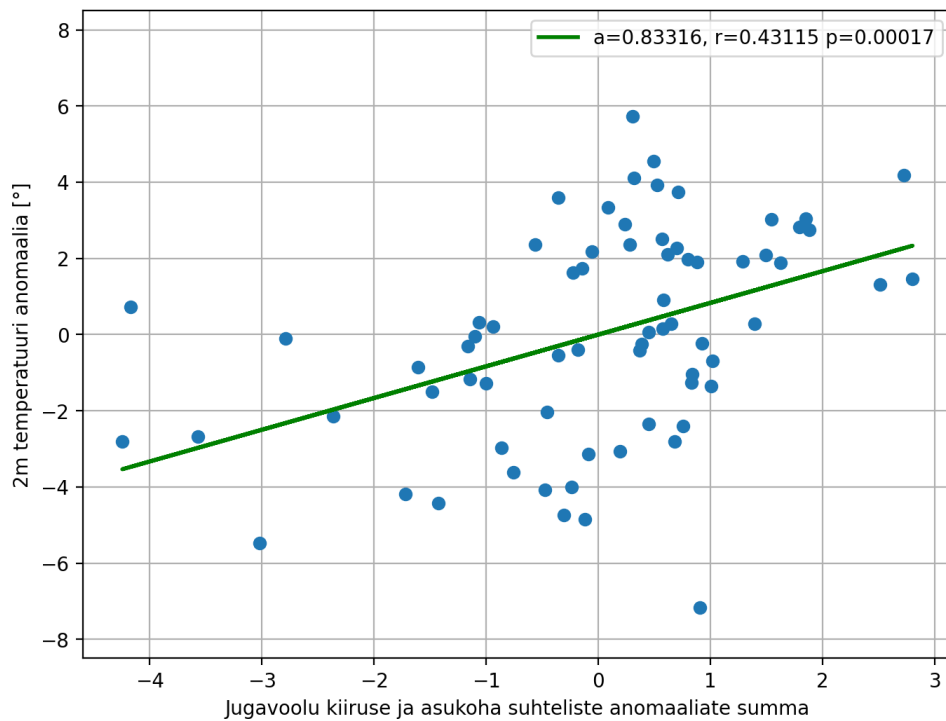
Ruumi kokkuhoiu huvides on analoogne analüüs teiste kuude ning sademete ja õhurõhu jaoks jäetud siinkohal esitamata ning tulemused on võetud kokku tabelisse 3.2.



Joonis 3.13: Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu asukoha ja Läänemere piirkonna keskmise temperatuuri vaheline korrelatsioon detsembris aastatel 1950-2020.



Joonis 3.14: Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu kiiruse ja Läänemere piirkonna keskmise temperatuuri vaheline korrelatsioon detsembris aastatel 1950-2020.



Joonis 3.15: Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu asukoha ja kiiruse suhteliste anomaaliade summa ja Läänemere piirkonna keskmise temperatuuri vaheline korrelatsioon detsembris aastatel 1950-2020.

Tabel 3.2: Läänemere piirkonna kuukeskmiste temperatuuride, sademete ja õhurõhu korrelatsioonikordajad Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu asukohaga  $A$ , kiirusega  $U$  ning asukoha ja kiiruse suhteliste anomaaliate summaga  $\delta A + \delta U$ . Korrelatsioonikordajate väärtuseid tähistavad vastavalt  $r_A$ ,  $r_U$  ja  $r_{\delta A + \delta U}$ . Statistiliselt olulised korrelatsioonid on paksus kirjas.

Kuu	Temperatuur			Sademed			Õhurõhk		
	$r_A$	$r_U$	$r_{\delta A + \delta U}$	$r_A$	$r_U$	$r_{\delta A + \delta U}$	$r_A$	$r_U$	$r_{\delta A + \delta U}$
Aug	0,123	0,002	0,085	<b>-0,292</b>	0,153	-0,094	<b>0,254</b>	-0,197	0,039
Sept	0,061	<b>0,462</b>	<b>0,341</b>	0,155	0,160	0,205	-0,110	-0,204	-0,205
Okt	<b>0,289</b>	<b>0,392</b>	<b>0,407</b>	-0,070	0,172	0,061	0,014	-0,129	-0,068
Nov	0,224	<b>0,338</b>	<b>0,386</b>	<b>0,268</b>	0,033	0,206	-0,209	0,124	-0,058
Dets	<b>0,403</b>	0,212	<b>0,431</b>	<b>0,416</b>	<b>0,363</b>	<b>0,547</b>	<b>-0,298</b>	<b>-0,388</b>	<b>-0,481</b>
Jaan	<b>0,475</b>	<b>0,293</b>	<b>0,516</b>	<b>0,482</b>	<b>0,333</b>	<b>0,547</b>	<b>-0,411</b>	<b>-0,312</b>	<b>-0,486</b>
Veebr	<b>0,411</b>	<b>0,337</b>	<b>0,530</b>	<b>0,278</b>	<b>0,362</b>	<b>0,453</b>	-0,102	<b>-0,422</b>	<b>-0,372</b>
Märts	<b>0,557</b>	0,070	<b>0,463</b>	<b>0,586</b>	0,207	<b>0,585</b>	<b>-0,324</b>	<b>-0,285</b>	<b>-0,450</b>
Apr	0,123	0,150	0,180	0,078	-0,126	-0,030	-0,068	0,050	-0,011
Mai	<b>0,234</b>	0,098	0,210	0,052	0,039	0,058	-0,135	-0,146	-0,178
Juuni	0,172	0,065	0,162	-0,116	0,090	-0,018	0,125	-0,070	0,038
Juuli	0,155	<b>0,263</b>	<b>0,302</b>	-0,179	0,223	0,032	0,182	-0,190	-0,006

**Temperatuur.** Septembris on kõikide kuude võrdluses kõige tugevam korrelatsioon jugavoolu kiirusega:  $r = 0,462$ . Ka oktoobris ja novembris esineb statistiliselt oluline korrelatsioon jugavoolu kiirusega, oktoobris on lisaks ka nõrk seos jugavoolu asukohaga. Detsembris on statistiliselt oluline ainult korrelatsioon jugavoolu asukohaga, jaanuaris ja veebruaris esineb oluline korrelatsioon mõlema suurusega, aga asukoha korrelatsioonikordajate väärtused on suuremad. Märtsis on kõikide kuude võrdluses kõige tugevam korrelatsioon jugavoolu asukohaga:  $r = 0,557$ , aga jugavoolu kiirusega korrelatsioon puudub. Mais esineb nõrk seos jugavoolu asukohaga ning juulis esineb väike korrelatsioon jugavoolu kiirusega.

Korrelatsioonid temperatuuri ning jugavoolu asukoha ja kiiruse suhteliste anomaaliate summa vahel on statistiliselt olulised septembrist märtsini ning juulis, aga juulis on korrelatsioonikordaja väärtus väiksem kui teistel mainitud kuudel. Nende kuude seast, kus antud seos on statistiliselt oluline, esineb kahel kuul - märtsis ja oktoobris - huvitav nähtus, et temperatuuri korrelatsioon jugavoolu asukoha ja kiiruse suhteliste anomaaliate summaga on väiksem kui korrelatsioon ainult kiirusega (septembris) ja korrelatsioon ainult asukohaga (märtsis). See näitab, et nendel kuudel on väga selgelt oluline ainult üks jugavoolu oleku faktor.

Antud tulemused toetavad hüpoteesi, et sügisel on Läänemere piirkonna ilma jaoks olulisem jugavoolu kiirus ning talvel ja kevadel on olulisem jugavoolu asukoht. Põneva asjaoluna võib veel tähele panna, et augustis on korrelatsioon jugavoolu kiirusega minimaalne ja septembris maksimaalne - selle põhjal võib öelda, et sügise alguses toimub atmosfäärsirkulatsioonis

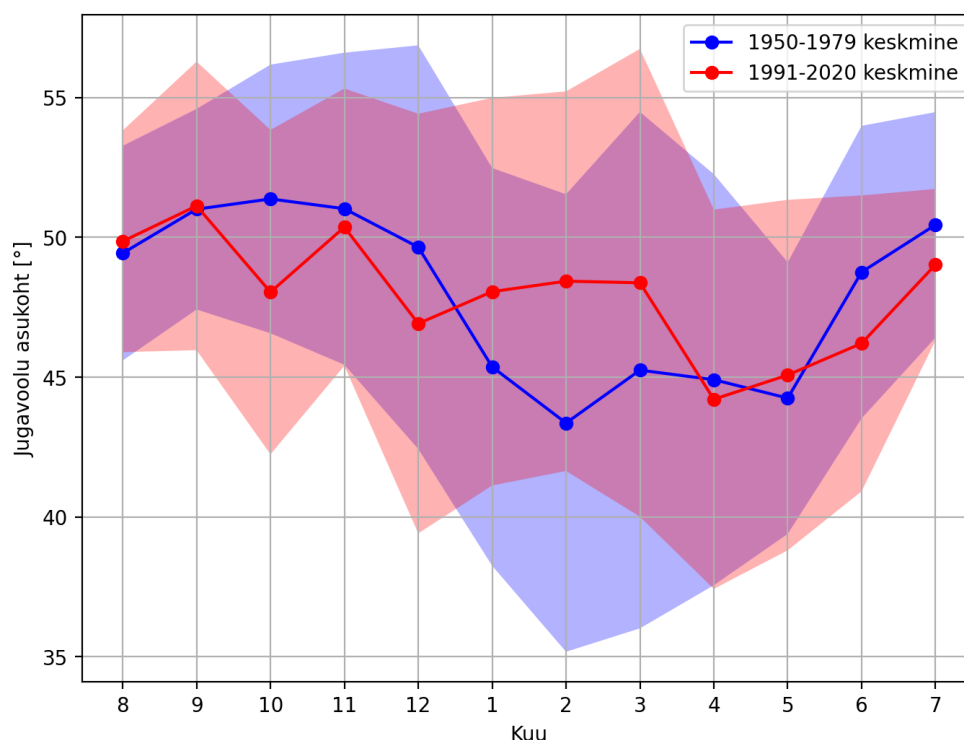


teatud režiiminihe. Sarnane küllaltki järsk hüpe toimub märtsist aprilli, kui kõikide kuude seast suurim korrelatsioon jugavoolu asukohaga (märtsis) asendub olulise seose puudumisega (aprillis).

**Sademed ja õhurõhk.** Sademete ja õhurõhu puhul esineb statistiliselt olulisi korrelatsioone vähem kui temperatuuri korral. Tabelist 3.2 selgub, et sademetel ja õhurõhul on oluline seos jugavooluga talvekuudel ja märtsis, teistel kuudel olulisi korrelatsioone peaaegu ei esine. Seega on selge, et sademete negatiivne trend aprillis ei ole seotud jugavoolu muutustega. Huvitaval kombel on augustis sademete kogusel ja õhurõhul nõrk, aga statistiliselt oluline seos jugavoolu asukohaga, kusjuures mõlemal kuul on korrelatsioon vastasmärgiline võrreldes teiste kuudega, kus esineb olulisi seoseid. Väike korrelatsioon sademete koguse ja jugavoolu asukoha vahel esineb novembris, aga üldiselt võib sügise kohta järeldada, et ei sademete kogus ega keskmine õhurõhk ei ole jugavoolu olekuga kuigi tugevalt seotud. Seevastu talvekuudel ja märtsis on korrelatsioonid suhteliselt tugevad: korrelatsioonikordajate väärtused sademete ning jugavoolu asukoha ja kiiruse suhteliste anomaaliate summa vahel ulatuvad 0,453-st veebruaris 0,585-ni märtsis.

### 3.3 Muutused polaarse jugavoolu olekus

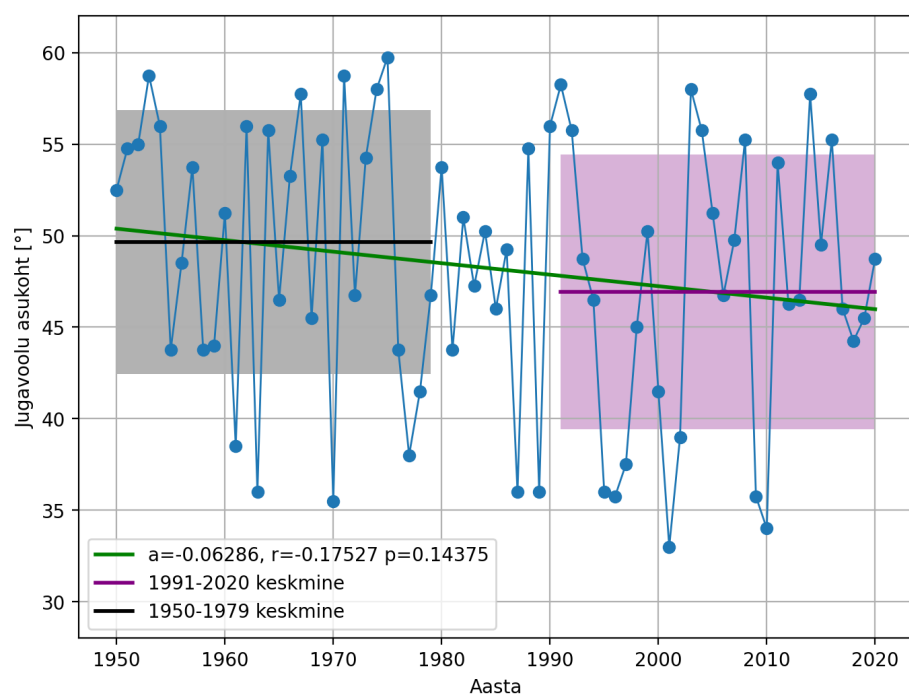
Järgnevalt analüüsin, kas ja kuidas on ajas muutunud polaarse jugavoolu keskmine asukoht ja kiirus ning nende aastased käigud. Jooniselt 3.16 selgub, et oktoobris on jugavoolu keskmine asukoht nihkunud mitu kraadi lõuna poole. Novembris on toimunud väga väike lõunasuunaline nihe, aga detsembris on asukoht jälle märkmisväärselt lõuna poole nihkunud. Need tulemused on päris ootamatud ja erinevad üldisest teadmisest, et jugavool on nihkunud põhja poole (Stocker *et al.*, 2013; BACC II autorite meeskond, 2015). Jaanuaris, veebruaris ja märtsis on samas toimunud väga selge põhjasuunaline nihe, mis on suurim veebruaris. Juunis ja juulis on jugavoolu asukoht taas lõuna poole nihkunud. Antud graafiku põhjal võib öelda, et jugavoolu asukoha aastase käigu amplituud on vähenenud, aastase käigu kuju on muutunud ebahääletasemaks ja talvine režiim ei kujune enam nii selgelt välja.



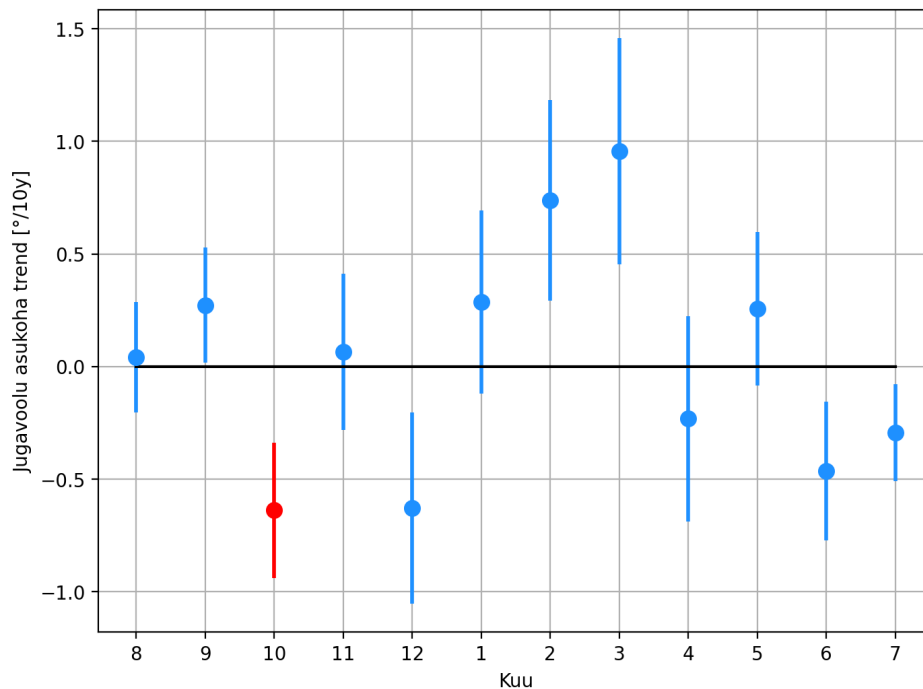
Joonis 3.16: Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu kuukeskmise asukoha keskmine aastane käik perioodidel 1950 - 1979 ja 1991 - 2020. Poolläbipaistev värvitud tsoon keskmise väärtuse ümber näitab standardhälvet, mis iseloomustab asukoha aastatevahelist hajuvust.

Joonis 3.17 näitab, et jugavoolu asukohal on detsembris tõepoolest negatiivne trend, aga suure hajuvuse tõttu ei ole see statistiliselt oluline. Meenutades, et detsembri keskmine temperatuur on aastate 2013-2020 jooksul olnud suhteliselt stabiilne ja keskmisest soojem, siis antud graafiku põhjal näeme, et see on seotud sellega, et nendel aastatel ei ole detsembris esinenud jugavoolu lõunapoolset olekut.

Joonis 3.18 kinnitab, et suured muutused jugavoolu asukohas (rohkem kui  $0,5^\circ$  dekaadis) on toimunud oktoobris ja detsembris (lõuna suunas) ning veebruaris ja märtsis (põhja suunas). Maksimaalne trend esineb veebruaris, ulatudes peaaegu  $1^\circ$ -ni dekaadis. Üllatuslikult aga on statistiliselt oluline ainult oktoobri trend, selle põhjus seisneb selles, et võrreldes talvekuude ja märtsiga on oktoobris jugavoolu asukoha aastatevaheline hajuvus väiksem.

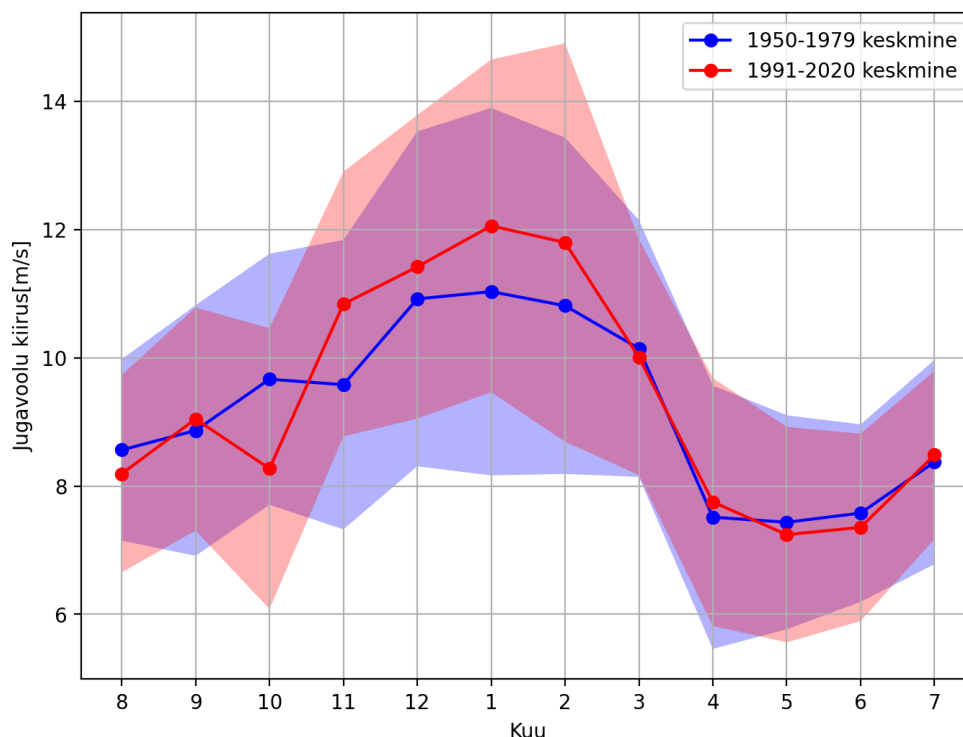


Joonis 3.17: Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu kuukeskmised asukohad detsembris perioodil 1950-2020.



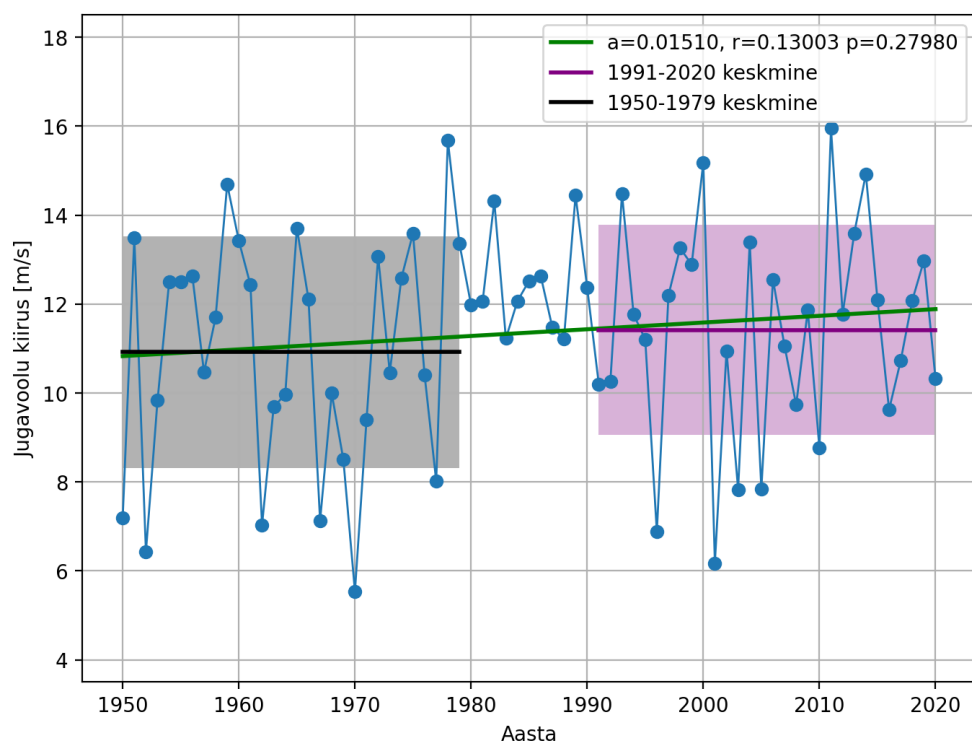
Joonis 3.18: Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu kuukeskmiste asukohtade lineaarsed trendid perioodil 01.1950 - 02.2021. Statistiliselt olulised trendid on värvitud punaseks.

Jooniselt 3.19 selgub, et oktoobris on jugavool muutunud aeglasemaks, novembrist veebruarini on jugavool muutunud kiiremaks ning teistel kuudel märkimisväärsed muutusi pole. Erinevalt jugavoolu asukohast on jugavoolu kiiruse aastase käigu amplituud hoopis kasvanud. Perioodi 1991-2020 keskmises aastases käigus toimub üleminekul oktoobrist novembrisse jugavoolu kiiruses väga suur hüpe, mida varasemas perioodis ei esinenud. Järsk kiiruse langus üleminekul märtsist aprilli on aga mõlemal juhul ligikaudu sama suur.

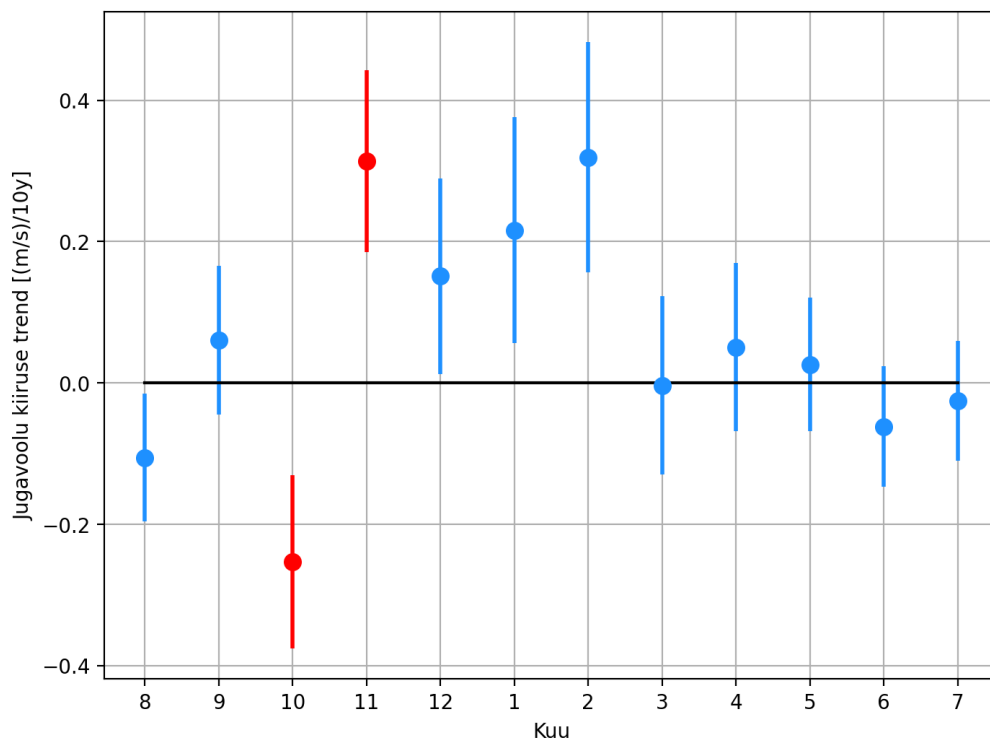


Joonis 3.19: Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu kuu keskmise kiiruse aastakäigud perioodidel 1950 - 1979 ja 1991 - 2020

Joonise 3.20 põhjal selget trendi jugavoolu detsembri kuukeskmises kiiruses välja ei tule, küll aga hakkab huvitava asjaoluna silma see, et jugavoolu kiiruse muutlikkus on ajas varieeruv. Näiteks 1980ndatel on jugavoolu kiirus muutunud keskmisest ligikaudu poole väiksemates piirides. Jooniselt 3.21 selgub, et statistiliselt olulised trendid esinevad ainult oktoobris (negatiivne) ja novembris (positiivne). Trendi väärtus on kõige suurem veebruaris, aga suure aastatevahelise hajuvuse tõttu pole see statistiliselt oluline.



Joonis 3.20: Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu kuukeskmised kiirused detsembris perioodil 1950-2020.



Joonis 3.21: Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu kuukeskmiste kiiruste lineaarsed trendid perioodil 01.1950 - 02.2021. Statistiliselt olulised trendid on värvitud punaseks.

Tabel 3.3: Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu kuukeskmiste asukohtade ja kiiruste muutused lineaarse trendi põhjal perioodil 01.1950 - 02.2021 koos standardhälbega. Statistiliselt olulised muutused on paksus kirjas.

Kuu	Asukoht [°]	Kiirus [m/s]
August	$0,3 \pm 1,7$	$-0,8 \pm 0,6$
September	$1,9 \pm 1,8$	$0,4 \pm 0,7$
Oktoober	<b><math>-4,5 \pm 2,1</math></b>	<b><math>-1,8 \pm 0,9</math></b>
November	$0,5 \pm 2,5$	<b><math>2,2 \pm 0,9</math></b>
Detsember	$-4,5 \pm 3,0$	$1,1 \pm 1,0$
Jaanuar	$2,1 \pm 2,9$	$1,6 \pm 1,2$
Veebruar	$5,3 \pm 3,2$	$2,3 \pm 1,2$
Märts	$6,8 \pm 3,6$	$-0,0 \pm 0,9$
Aprill	$-1,6 \pm 3,2$	$0,4 \pm 0,8$
Mai	$1,8 \pm 2,4$	$0,2 \pm 0,7$
Juuni	$-3,3 \pm 2,2$	$-0,4 \pm 0,6$
Juuli	$-2,1 \pm 1,5$	$-0,2 \pm 0,6$

### 3.4 Arutelu

Eelnev analüüs võimaldab vastata magistritöö alguses esitatud uurimisküsimustele ning kinnitada või lükata ümber töö hüpoteese. Magistritöö esimene uurimisküsimus oli sõnastatud järgnevalt:

- Kas Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu keskmises asendis ja kiiruses esineb perioodil 01.1950 - 02.2021 statistiliselt olulisi muutuseid?

Jugavoolu asukohas on statistiliselt oluline muutus esinenud ainult oktoobrikuus ning see on negatiivne ehk jugavool on nihkunud lõuna poole:  $-4,5^\circ \pm 2,1^\circ$ . Ühtegi positiivset trendi jugavoolu asukohas, mis oleks statistiliselt oluline ja kinnitaks jugavoolu nihkumist põhja poole, uuritud andmetest välja ei tulnud. Jugavoolu kiiruses on toimunud statistiliselt oluline negatiivne muutus oktoobris ( $-1,8 \text{ m/s} \pm 0,9 \text{ m/s}$ ) ja statistiliselt oluline positiivne muutus novembris ( $2,2 \text{ m/s} \pm 0,9 \text{ m/s}$ ). Rohkem statistiliselt olulisi muutuseid jugavoolu kiiruses ei esinenud. Tasub siiski tähele panna, et veebruaris ja märtsis on jugavool lineaarse trendi alusel märkimisväärselt põhja poole nihkunud, vastavalt  $5,3 \pm 3,2^\circ$  ja  $6,8 \pm 3,6^\circ$ , aga statistiliselt oluliseks ei saa neid muutusi lugeda jugavoolu asukoha suure aastatevahelise hajuvuse tõttu. Sarnane olukord on jugavoolu kiiruse suurenemisega veebruaris: lineaarse trendi järgi on kiirus kasvanud  $2,3 \text{ m/s} \pm 1,2 \text{ m/s}$ , aga suure hajuvuse tõttu pole see statistiliselt oluline.

Teine uurimisküsimus oli:

- Kas ja kuidas on perioodil 01.1950 - 02.2021 muutunud jugavoolu asukoha ja kiiruse aastane käik?

Jugavoolu asukoha aastase käigu amplituud on vähenenud, aastase käigu kuju on muutunud ebaühtlasemaks (jugavool liigub kuude lõikes põhja-lõuna sihis rohkem edasi-tagasi) ning jugavoolu talvine režiim ei kujune enam nii selgelt välja. Jugavoolu kiiruse aastase käigu amplituud on kasvanud, kuna novembris, detsembris, jaanuaris ja veebruaris on jugavool muutunud kiiremaks.

Alapeatükis 3.2 näitasin, millistel kuudel on statistiliselt oluline seos Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu keskmise asukoha ja kiiruse ning Läänemere piirkonna keskmise temperatuuri vahel, ning koos sellega sai kinnitust ka hüpotees, et sügisel on Läänemere piirkonna ilm mõjutatud peamiselt jugavoolu kiiruse poolt ning talvel ja kevadel on olulisem jugavoolu asukoht. Sügiskuudel on Läänemere piirkonna temperatuuril tugevam korrelatsioon jugavoolu kiirusega, detsembri märtsini on tugevam korrelatsioon asukohaga. Samas oleks kevade asemel täpsem öelda varakevadel, sest alates aprillist enam olulisi seoseid ei ole.

Magistritöö esimene põhihüpotees oli sõnastatud järgnevalt:

- Uuritava perioodi jooksul on Põhja-Atlandi polaarne jugavool muutunud kiiremaks ja nihkunud põhja poole. Muutused on kõige suuremad talvel ja kevadel ning see põhjustab Läänemere piirkonnas talvede hilisema alguse ja talvede lühenemise, kevade varasema alguse ning temperatuuri aastase käigu amplituudi vähenemise.

Alapeatükis 3.3 esitatud analüüs ei kinnita selgelt, et jugavool oleks nihkunud põhja poole ja muutunud kiiremaks. Lineaarse trendi järgi on jugavool kõige rohkem põhja poole nihkunud küll veebruaris ja märtsis, aga need muutused pole statistiliselt olulised. Siiski võib öelda, et antud kuudes on jugavoolu keskmises asukohas põhjasuunaline nihe toimunud. Statistiliselt oluline muutus jugavoolu asukohas esines ainult oktoobris ning see oli hoopis lõunasuunaline. Kuna aprillis ja mais olulised muutused jugavoolu asukohas ja kiiruses puuduvad ning jugavoolu kiiruses esines statistiliselt oluline kasv ainult novembris, ei saa ka üheselt öelda, et muutused oleksid suurimad talvel ja kevadel.

Kuna novembris on jugavool statistiliselt olulisel määral kiiremaks muutunud ja novembrikuu keskmisel temperatuuril on oluline seos just jugavoolu kiirusega, panustab jugavoolu kiiruse kasv novembris talvede hilisemasse algusesse. Samas jugavoolu asukoha lõunasuunaline nihkumine detsembris ja väike muutus kiiruses ei ole kooskõlas talvede varasema algusega. Selle põhjal võiks hoopis eeldada, et temperatuur langeb talve alguses kiiremini kui varem, aga detsembri keskmine temperatuur on märgatavalt tõusnud ( $2,9^{\circ} \pm 1,1^{\circ}$  aastatel 1950-2020).

Antud asjaolu ei kinnita hüpoteesi, et talvede hilisem algus tuleneb muutustest polaarse jugavoolu olekus. Küll aga on märtsis toimunud jugavoolu asukohas märgatav nihe põhja poole ning kuna antud kuu keskmisel temperatuuril on tugev korrelatsioon jugavoolu asukohaga, siis on jugavoolu omaduste muutumine tõepoolest panustanud kevade varasemasse algusesse. Samas on soojenemine aprillis ja mais põhjustatud muude tegurite poolt, kuna olulised muutused ja korrelatsioonid nendes kuudes puuduvad.

Kuigi jugavoolu nihkumist põhja poole veebruaris ja märtsis ning kiiremaks muutumist veebruaris ei saa lugeda statistiliselt oluliseks, on need muutused suhteliselt tugevate seoste tõttu siiski antud kuude keskmise temperatuuri kasvu panustanud ja seega vähendanud temperatuuri aastase käigu amplituudi. Küll aga ei saa antud töö põhjal nimetatada polaarse jugavoolu muutusi peamiseks temperatuuri aastase käigu amplituudi vähenemise põhjuseks. Talvede kiirema soojenemise põhjuseid tuleks edasi uurida, võimalikud soojenemist põhjustavad tegurid on näiteks Arktiline võimendus või muutused Läänemere jääkattes.

Magistritöö teine põhihüpotees oli järgnev:

- Võrreldes talve ja kevadega on sügisel jugavoolu asukoht ja kiirus muutunud vähe ja/või vastupidises suunas. Selle tõttu on keskmise temperatuuri tõus sügisel olnud mõõdukam kui talvel ja kevadel ning see seletab ka sügiskuudel vähenenud tormisust.

Võrreldes jaanuari, veebruari ja märtsiga on jugavoolu asukoht septembris ja novembris muutunud vähem ning oktoobris vastupidises suunas. Jugavoolu kiirus septembris on muutunud vähem kui talvekuudel ja märtsis, oktoobris on jugavool aeglustunud. Seevastu novembris on jugavool muutunud kiiremaks ning muutuse suurus (2,2 m/s) jääb alla ainult veebruarile (2,3 m/s). Seega peab antud hüpotees paika septembri ja oktoobri jaoks jaanuari, veebruari ja märtsi suhtes. Novembris peab hüpotees paika jugavoolu asukoha, aga mitte kiiruse jaoks. Saadud tulemuste põhjal võib öelda, et oktoobris on keskmise temperatuuri tõus olnud väiksem kui teistel kuudel polaarse jugavoolu muutuste tõttu: jugavoolu aeglustumine ja nihkumine lõuna poole on summutanud üldise kliima soojenemise mõju. Sama ei saa väita septembri ja novembri kohta. Jugavoolu muutused oktoobris võivad olla seotud tormisuse vähenemisega, aga kuna keskmine sademete kogus ja õhurõhk oktoobris pole jugavoolu olekuga korreleeritud, vajab see veel edasist uurimist.



# **Suuremastaapse atmosfääritsirkulatsiooni mõju aastaaegade nihkumisele Läänemere piirkonnas**

## **Sulev Tõkke**

### **Kokkuvõte**

Käesolevas magistritöös analüüsisin, kuidas on perioodil 01.1950 - 02.2021 muutunud kuukeskmised temperatuurid, sademete kogused ja merepinnale taandatud õhurõhud Läänemere piirkonnas. Tegin kindlaks, millistel kuudel ja kui tugevalt on antud parameetrid seotud Põhja-Atlandi polaarse jugavoolu asukoha ja kiirusega. Uurisin, kas ja kuidas on antud perioodi jooksul polaarse jugavoolu kuukeskmised asukohad ja kiirused muutunud. Antud tulemuste põhjal sain järeldada, kas ja millisel määral on aastaaegade nihkumine Läänemere piirkonnas seotud muutustega polaarse jugavoolu olekus.

Uuritud perioodil esines statistiliselt oluline trend kõikide kuude keskmistes temperatuurides, välja arvatud oktoobris ja juunis. Kuna soojenemine on kõige tugevam talvekuudel, on Läänemere piirkonnas vähenenud temperatuuri aastase käigu amplituud. Sadamete ja õhurõhu puhul esines statistiliselt olulisi muutuseid vähem. Korrelatsioonide analüüsimise kaudu leidsin, et Läänemere piirkonna kuukeskmised temperatuurid on polaarse jugavoolu asukoha ja kiirusega positiivselt korreleeritud septembrist märtsini, kusjuures sügisel on olulisem jugavoolu kiirus ning talvel ja märtsis on olulisem jugavoolu asukoht.

Jugavoolu asukohas ja kiiruses esines vähe statistiliselt olulisi muutuseid. Üllatava tulemusena oli oktoober ainus kuu, kus nii jugavoolu asukoht kui kiirus olid statistiliselt olulisel määral muutunud ning need muutused olid hoopis negatiivsed: oktoobris on perioodil 1950-2020 lineaarse trendi põhjal jugavool nihkunud  $4,5^{\circ} \pm 2,1^{\circ}$  lõuna poole ja muutunud  $1,8 \text{ m/s} \pm 0,9 \text{ m/s}$  võrra aeglasemaks. Selle tõttu on oktoobri keskmine temperatuur kasvanud vähem kui teistel kuudel. Samas esines novembris statistiliselt oluline positiivne muutus jugavoolu kiiruses, mis on panustanud talvede hilisemasse algusesse.

Veebruaris ja märtsis on antud perioodil toimunud jugavoolu nihkumine põhja poole, mis suure aastatevahelise hajuvuse tõttu on statistiliselt ebaoluline, aga siiski märkimisväärne: lineaarse trendi järgi vastavalt  $5,3 \pm 3,2^{\circ}$  ja  $6,8 \pm 3,6^{\circ}$ . Kuna mõlema kuu temperatuuril on küllaltki tugev korrelatsioon jugavoolu asukohaga, on selline nihkumine panustanud keskmise temperatuuri tõusu, mis on vähendanud temperatuuri aastase käigu amplituudi ja toonud kevade algust varasemaks. Samas on selge, et muutused polaarse jugavoolu olekus pole ainus aastaaegade nihkumise põhjus ning suuremastaapse atmosfääritsirkulatsiooni täpne mõju aastaaegade nihkumisele ja osakaal teiste teguritega võrreldes vajab veel edasist uurimist.

# Tänuavaldused

Tänan oma juhendajaid Piia Posti ja Velle Tolli mulle pühendatud aja ja energia eest. Magistritöö kirjutamise käigus oli meil palju põnevaid arutelusid, mis aitasid alati sammukese targemaks saada, ja ka mõista seda, kui paljut ma veel ei tea. Piia ja Velle jätsid mulle magistritöö eesmärgi püstitamisel ja töö teostamisel päris palju vabadust, mis ühtlasi tähendas ka võimalust ise vastutada. Usun, et selline koostöö vorm on aidanud mul magistriõpingute jooksul palju areneda, ja ma ootan elevusega võimalust tarkuse poole sammumist jätkata.

Lisaks tänan ka Helen Asuküla, kelle südamlük toetus ja asjatundlikud nõuanded on alati raskel hetkel edasi aidanud. Mainimata ei saa jätta ka teisi pereliikmeid ja sõpru, kes magistritöö kirjutamise kiirel ajal on väga mõistvad ja toetavad olnud.

Sulev Tõkke

# Kasutatud kirjandus

- Andreas, L., Getzlaff, K. ja Harlass, J. (märts 2011), „Detailed assessment of climate variability of the Baltic Sea area for the period 1958-2009“, *Climate Research* **46**.
- Athanasiadis, P. J., Wallace, J. M. ja Wettstein, J. J. (2010), „Patterns of Wintertime Jet Stream Variability and Their Relation to the Storm Tracks“, *Journal of the Atmospheric Sciences* **67.5**, lk. 1361–1381.
- Ault, T. R. *et al.* (2011), „Northern Hemisphere modes of variability and the timing of spring in western North America“, *Journal of Climate* **24.15**, lk. 4003–4014.
- BACC II autorite meeskond (2015), *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, Springer.
- Baker, H. S., Woollings, T. ja Mbengue, C. (2017), „Eddy-Driven Jet Sensitivity to Diabatic Heating in an Idealized GCM“, *Journal of Climate* **30.16**, lk. 6413–6431.
- Barnes, E. A. (2013), „Revisiting the evidence linking Arctic amplification to extreme weather in midlatitudes“, *Geophysical Research Letters* **40.17**, lk. 4734–4739.
- Barnston, A. G. ja Livezey, R. E. (1987), „Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns“, *Monthly Weather Review* **115.6**, lk. 1083–1126.
- Bell, B. *et al.* (2020a), „ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1950 to 1978 (preliminary version). Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://cds.climate.copernicus-climate.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels-monthly-means-preliminary-back-extension?tab=overview>“.
- Bell, B. *et al.* (2020b), „ERA5 monthly averaged data on single levels from 1950 to 1978 (preliminary version). Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://cds.climate.copernicus-climate.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means-preliminary-back-extension?tab=overview>“.
- Casty, C. *et al.* (2007), „A European pattern climatology 1766-2000“, *Climate Dynamics* **29.7-8**, lk. 791–805.

- Cattiaux, J. *et al.* (2010), „Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate“, *Geophysical Research Letters* **37**.20.
- Charney, J. G. (1947), „The Dynamics of Long Waves in a Baroclinic Westerly Current“, *Journal of Atmospheric Sciences* **4**.5, lk. 136–162.
- Cohen, J. *et al.* (2014), „Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather“, *Nature geoscience* **7**.9, lk. 627–637.
- Cornes, R. C., Jones, P. D. ja Qian, C. (2017), „Twentieth-century trends in the annual cycle of temperature across the Northern Hemisphere“, *Journal of Climate* **30**.15, lk. 5755–5773.
- Coumou, D. *et al.* (2018), „The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation“, *Nature Communications* **9**.1, lk. 1–12.
- Czernecki, B. ja Miętus, M. (2017), „The thermal seasons variability in Poland, 1951-2010“, *Theoretical and Applied Climatology* **127**.1-2, lk. 481–493.
- Deser, C. *et al.* (2012), „Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability“, *Climate dynamics* **38**.3, lk. 527–546.
- Drost, F. ja Karoly, D. (2012), „Evaluating global climate responses to different forcings using simple indices“, *Geophysical research letters* **39**.16.
- Eady, E. T. (1949), „Long Waves and Cyclone Waves“, *Tellus* **1**.3, lk. 33–52.
- Eichelberger, S. J. ja Hartmann, D. L. (2007), „Zonal Jet Structure and the Leading Mode of Variability“, *Journal of Climate* **20**.20, lk. 5149–5163.
- Feldstein, S. B. ja Franzke, C. (2006), „Are the North Atlantic Oscillation and the northern annular mode distinguishable?“, *Journal of Atmospheric Sciences* **63**.11, lk. 2915–2930.
- Hall, R. *et al.* (2015), „Drivers of North Atlantic Polar Front jet stream variability“, *International Journal of Climatology* **35**.8, lk. 1697–1720.
- Hannachi, A., Woollings, T. ja Fraedrich, K. (2012), „The North Atlantic jet stream: A look at preferred positions, paths and transitions“, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **138**.665, lk. 862–877.
- Hanssen-Bauer, I. *et al.* (2009), „Climate in Norway 2100“, *Background information to NOU Climate adaptation (In Norwegian: Klima i Norge 2100. Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilpassing)*, Oslo: Norsk klimasenter.
- Harris, C. R. *et al.* (2020), „Array programming with NumPy“, *Nature* **585**, lk. 357–362.
- Held, I. M. ja Hou, A. Y. (1980), „Nonlinear Axially Symmetric Circulations in a Nearly Inviscid Atmosphere“, *Journal of Atmospheric Sciences* **37**.3, lk. 515–533.
- Hersbach, H. *et al.* (2019a), „ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 10.24381/cds.6860a573“.

- Hersbach, H. *et al.* (2019b), „ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 10.24381/cds.f17050d7“.
- Hersbach, H. *et al.* (2020), „The ERA5 global reanalysis“, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **146**.730, lk. 1999–2049.
- Holton, J. ja Hakim, G. (2013), *Introduction. An Introduction to Dynamic Meteorology*, Elsevier.
- Hoskins, B. J. ja Valdes, P. J. (1990), „On the Existence of Storm-Tracks“, *Journal of Atmospheric Sciences* **47**.15, lk. 1854–1864.
- Hunter, J. D. (2007), „Matplotlib: A 2D graphics environment“, *Computing in science & engineering* **9**.3, lk. 90–95.
- Hurrell, J. W. ja Deser, C. (2010), „North Atlantic climate variability: the role of the North Atlantic Oscillation“, *Journal of marine systems* **79**.3-4, lk. 231–244.
- Hurrell, J. W. *et al.* (jaanuar 2003), „The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact“, *Geophys. Monogr. Ser.* **134**.
- Hurrell, J. W. (1995), „Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation“, *Science* **269**.5224, lk. 676–679.
- Jaagus, J. ja Kull, A. (2011), „Changes in surface wind directions in Estonia during 1966-2008 and their relationships with large-scale atmospheric circulation“, *Estonian Journal of Earth Sciences* **60**.4.
- Jaagus, J. *et al.* (2003), „Spatial and temporal variability of climatic seasons on the East European Plain in relation to large-scale atmospheric circulation“, *Climate Research* **23**.2, lk. 111–129.
- Jaagus, J. *et al.* (2017), „Trends and regime shifts in climatic conditions and river runoff in Estonia during 1951-2015“, *Earth System Dynamics* **8**.4, lk. 963–976.
- Jones, P., Briffa, K. ja Osborn, T. (2003), „Changes in the Northern Hemisphere annual cycle: Implications for paleoclimatology?“, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **108**.D18.
- Karpechko, A. Y. (2010), „Uncertainties in future climate attributable to uncertainties in future Northern Annular Mode trend“, *Geophysical Research Letters* **37**.20.
- Krishnamurti, T. N. (1961), „THE SUBTROPICAL JET STREAM OF WINTER“, *Journal of Meteorology* **18**.2, lk. 172–191.
- Kull, A. *et al.* (2008), „The effects of fluctuating climatic conditions and weather events on nutrient dynamics in a narrow mosaic riparian peatland“.
- Lakson, M., Post, P. ja Sepp, M. (2019), „The Impact of Atmospheric Circulation on Air Temperature Rise in Estonia“, *Frontiers in Earth Science* **7**, lk. 131.

- Lee, S. (1997), „Maintenance of Multiple Jets in a Baroclinic Flow“, *Journal of the Atmospheric Sciences* **54**.13, lk. 1726–1738.
- Lee, S. ja Kim, H.-k. (2003), „The Dynamical Relationship between Subtropical and Eddy-Driven Jets“, *Journal of the Atmospheric Sciences* **60**.12, lk. 1490–1503.
- Li, C. ja Wettstein, J. J. (2012), „Thermally Driven and Eddy-Driven Jet Variability in Reanalysis“, *Journal of Climate* **25**.5, lk. 1587–1596.
- Lorenz, D. J. ja Hartmann, D. L. (2001), „Eddy-zonal flow feedback in the Southern Hemisphere“, *Journal of the atmospheric sciences* **58**.21, lk. 3312–3327.
- Lorenz, D. J. ja Hartmann, D. L. (2003), „Eddy-zonal flow feedback in the Northern Hemisphere winter“, *Journal of climate* **16**.8, lk. 1212–1227.
- Madonna, E. *et al.* (2017), „The link between eddy-driven jet variability and weather regimes in the North Atlantic-European sector“, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **143**.708, lk. 2960–2972.
- McCabe, G. J. *et al.* (2012), „Influences of the El Niño Southern Oscillation and the Pacific Decadal Oscillation on the timing of the North American spring“, *International Journal of Climatology* **32**.15, lk. 2301–2310.
- McKinnon, K. A., Stine, A. R. ja Huybers, P. (2013), „The spatial structure of the annual cycle in surface temperature: Amplitude, phase, and Lagrangian history“, *Journal of Climate* **26**.20, lk. 7852–7862.
- Met Office (2010-2015), *Cartopy: a cartographic python library with a Matplotlib interface*, Exeter, Devon.
- Monahan, A. H. ja Fyfe, J. C. (2006), „On the Nature of Zonal Jet EOFs“, *Journal of Climate* **19**.24, lk. 6409–6424.
- Moore, G. W. K., Pickart, R. S. ja Renfrew, I. A. (2011), „Complexities in the climate of the subpolar North Atlantic: A case study from the winter of 2007“, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **137**.656, lk. 757–767.
- Moore, G. W. K., Renfrew, I. A. ja Pickart, R. S. (2013), „Multidecadal Mobility of the North Atlantic Oscillation“, *Journal of Climate* **26**.8, lk. 2453–2466.
- O'Reilly, C. H. *et al.* (2017), „The Gulf Stream influence on wintertime North Atlantic jet variability“, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **143**.702, lk. 173–183.
- Panetta, R. L. (1993), „Zonal Jets in Wide Baroclinically Unstable Regions: Persistence and Scale Selection“, *Journal of Atmospheric Sciences* **50**.14, lk. 2073–2106.
- Panetta, R. L. ja Held, I. M. (1988), „Baroclinic Eddy Fluxes in a One-Dimensional Model of Quasi-geostrophic Turbulence“, *Journal of Atmospheric Sciences* **45**.22, lk. 3354–3365.
- Park, B.-J. *et al.* (2018), „Anthropogenic and natural contributions to the lengthening of the summer season in the Northern Hemisphere“, *Journal of Climate* **31**.17, lk. 6803–6819.

- Peña-Ortiz, C., Barriopedro, D. ja García-Herrera, R. (2015), „Multidecadal Variability of the Summer Length in Europe“, *Journal of Climate* **28**.13, lk. 5375–5388.
- Qian, C. ja Zhang, X. (2015), „Human influences on changes in the temperature seasonality in mid-to high-latitude land areas“, *Journal of Climate* **28**.15, lk. 5908–5921.
- Rimbu, N. ja Lohmann, G. (2011), „Winter and summer blocking variability in the North Atlantic region-evidence from long-term observational and proxy data from southwestern Greenland“, *Climate of the Past* **7**.2, lk. 543–555.
- Rossby, C. ja Willett, H. (1948), „The circulation of the upper troposphere and lower stratosphere“, *Science* **108**.2815, lk. 643–652.
- Ruosteenoja, K., Markkanen, T. ja Räisänen, J. (2020), „Thermal seasons in northern Europe in projected future climate“, *International Journal of Climatology* **40**.10, lk. 4444–4462.
- Rutgersson, A. *et al.* (september 2014), „Observed changes and variability of atmospheric parameters in the Baltic Sea region during the last 200 years“, *Climate Research* **61**, lk. 177–190.
- Räisänen, J. (2019), „Effect of atmospheric circulation on recent temperature changes in Finland“, *Climate Dynamics* **53**.9, lk. 5675–5687.
- Santos, J. A., Woollings, T. ja Pinto, J. G. (2013), „Are the Winters 2010 and 2012 Archetypes Exhibiting Extreme Opposite Behavior of the North Atlantic Jet Stream?“, *Monthly Weather Review* **141**.10, lk. 3626–3640.
- Schulzweida, U. (oktoober 2019), „CDO User Guide“.
- Seager, R. *et al.* (2010), „Northern Hemisphere winter snow anomalies: ENSO, NAO and the winter of 2009/10“, *Geophysical Research Letters* **37**.14.
- Serreze, M. C. ja Barry, R. G. (2011), „Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis“, *Global and Planetary Change* **77**.1, lk. 85–96.
- Stine, A. R., Huybers, P. ja Fung, I. Y. (2009), „Changes in the phase of the annual cycle of surface temperature“, *Nature* **457**.7228, lk. 435–440.
- Stine, A. R. ja Huybers, P. (2012), „Changes in the Seasonal Cycle of Temperature and Atmospheric Circulation“, *Journal of Climate* **25**.21, lk. 7362–7380.
- Stocker, T. *et al.* (2013), „Technical Summary“, teoses: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, toim. T. Stocker *et al.*, Cambridge, United Kingdom ja New York, NY, USA: Cambridge University Press, ptk TS, lk. 33–115.
- Stull, R. B. *et al.* (2018), „Practical meteorology: an algebra-based survey of atmospheric science“.
- Zveryaev, I. (2007), „Climatology and long-term variability of the annual cycle of air temperature over Europe“, *Russian Meteorology and Hydrology* **32**.7, lk. 426–430.
- Tartu Ülikool (2018), „UT Rocket“.

- Thompson, D. W., Lee, S. ja Baldwin, M. P. (2003), „Atmospheric processes governing the northern hemisphere annular mode/North Atlantic oscillation“, *Geophysical Monograph-American Geophysical Union* **134**, lk. 81–112.
- Thompson, D. W. ja Wallace, J. M. (1998), „The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields“, *Geophysical research letters* **25.9**, lk. 1297–1300.
- Thompson, D. W. ja Wallace, J. M. (2001), „Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode“, *Science* **293.5527**, lk. 85–89.
- Tietäväinen, H., Tuomenvirta, H. ja Venäläinen, A. (2010), „Annual and seasonal mean temperatures in Finland during the last 160 years based on gridded temperature data“, *International Journal of Climatology* **30.15**, lk. 2247–2256.
- Vallis, G. K. ja Gerber, E. P. (2008), „Local and hemispheric dynamics of the North Atlantic Oscillation, annular patterns and the zonal index“, *Dynamics of atmospheres and oceans* **44.3-4**, lk. 184–212.
- Van Rossum, G. ja Drake, F. L. (2009), *Python 3 Reference Manual*, Scotts Valley, CA: CreateSpace.
- Virtanen, P. *et al.* (2020), „SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python“, *Nature Methods* **17**, lk. 261–272.
- Walker, G. T. ja Bliss, E. (1932), „World Weather V“, *Memoirs of the Royal Meteorological Society* **IV.36**.
- Wallace, J. M. (2000), „North Atlantic Oscillation/annular mode: two paradigms—one phenomenon“, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **126.564**, lk. 791–805.
- Wallace, J. M. ja Gutzler, D. S. (1981), „Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter“, *Monthly weather review* **109.4**, lk. 784–812.
- Wang, X. L., Swail, V. R. ja Zwiers, F. W. (2006), „Climatology and Changes of Extratropical Cyclone Activity: Comparison of ERA-40 with NCEP–NCAR Reanalysis for 1958–2001“, *Journal of Climate* **19.13**, lk. 3145–3166.
- Wanner, H. *et al.* (2001), „North Atlantic Oscillation—Concepts and studies“.
- Williams, G. P. (1979), „Planetary Circulations: 2. The Jovian Quasi-Geostrophic Regime“, *Journal of Atmospheric Sciences* **36.5**, lk. 932–969.
- Wittman, M. A. H., Charlton, A. J. ja Polvani, L. M. (2005), „On the Meridional Structure of Annular Modes“, *Journal of Climate* **18.12**, lk. 2119–2122.
- Woollings, T., Czuchnicki, C. ja Franzke, C. (2014), „Twentieth century North Atlantic jet variability“, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **140.680**, lk. 783–791.
- Woollings, T., Hannachi, A. ja Hoskins, B. (2010a), „Variability of the North Atlantic eddy-driven jet stream“, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **136.649**, lk. 856–868.



- Woollings, T. *et al.* (2008), „A New Rossby Wave–Breaking Interpretation of the North Atlantic Oscillation“, *Journal of the Atmospheric Sciences* **65**.2, lk. 609–626.
- Woollings, T. *et al.* (2010b), „A regime view of the North Atlantic Oscillation and its response to anthropogenic forcing“, *Journal of Climate* **23**.6, lk. 1291–1307.
- Woollings, T. *et al.* (2018a), „Blocking and its response to climate change“, *Current Climate Change Reports* **4**.3, lk. 287–300.
- Woollings, T. *et al.* (2018b), „Daily to Decadal Modulation of Jet Variability“, *Journal of Climate* **31**.4, lk. 1297–1314.

# **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Sulev Tõkke,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

**Suuremastaapse atmosfäärsirkulatsiooni mõju aastaaegade nihkumisele  
Läänemere piirkonnas,**

mille juhendajad on Piia Post, PhD ja Velle Toll, PhD,

- (a) reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - (b) üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
  3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartu, 4. juuni 2021. a.